

Antti Aimala

# Puun modifioinnin historia, nykytila ja tulevaisuus

Opinnäytetyö  
Puutekniikan koulutusohjelma

2018



Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Antti Aimala	Puutalousinsinööri (AMK)	Helmikuu 2018
<b>Opinnäytetyön nimi</b>  Puun modifioinnin historia, nykytila ja tulevaisuus		74 sivua
<b>Toimeksiantaja</b>  Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu		
<b>Ohjaaja</b>  Lehtori Vesa Kankkunen		
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia eri puun modifiointimenetelmien historiaa, nykytilaa ja tulevaisuutta. Puun modifioinnin tarkoituksena on muuttaa puun käyttöominaisuuksia sen koko elinkaaren ajaksi. Puun modifioinnilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi lahonsuojaukseen, mittapysyvyyteen ja lujuusominaisuuksiin. Modifioinnilla pyritään pääsääntöisesti suojaamaan puuta lahoa vastaan. Laho on puun lujuusominaisuuksien kannalta keskeisessä roolissa, sillä vähäinenkin laho heikentää puun lujuusominaisuuksia merkittävästi.</p> <p>Modifiointimenetelmiä on useita ja ne voidaan jakaa kemialliseen modifiointiin, lämpömodifiointiin, pintamodifiointiin, sekä modifiointiin kyllästämällä. Työssä käsiteltyjä modifiointimenetelmiä ovat lämpökäsittely, painekyllästys kupari- ja öljykyllästeillä, vesilasikyllästys, asetylointi ja furfulointi. Tämän lisäksi käsitellään myös puu-muovikomposiitteja. Eri modifiointimenetelmillä saadaan aikaan hyvin erilaisia ominaisuuksia, joten menetelmä tulisi valita käyttökohteen ja haluttujen ominaisuuksien perusteella.</p> <p>Perinteinen painekyllästys on ollut jo todella pitkään johtavassa roolissa puun suojauksessa lahoa vastaan. Nykyisin lisääntyneen ympäristötietouden seurauksena kiinnitetään kuitenkin yhä enemmän huomiota käytettäviin rakennusmateriaaleihin. Ennen hyvin laajasti käytössä olleiden CCA-kyllästeiden käyttökielto on avannut paljon mahdollisuuksia muille modifiointimenetelmille. Seurauksena on kehitetty useita menetelmiä, joilla voidaan parantaa tuotteen ympäristöystävällisyyttä ja samalla parannettua puun ominaisuuksia. Työn tarkoituksena olikin selvittää se, että onko uusilla ympäristöystävällisemmillä menetelmillä mahdollista korvata kupari- ja kreosoottikyllästeet. Modifiointimenetelmän tulisi siis antaa hyvä lahonsuoja ja olla samalla hinnaltaan kilpailukykyinen.</p> <p>Modifiointi nostaa aina puun hintaa, joten on tärkeää saada kuluttajat vakuuttuneeksi tuotteen hyödyistä. Tässä tutkimustyö on avainasemassa, joten tulevaisuudessa onkin tärkeää panostaa laajamittaiseen ja puolueettomaan tutkimukseen. Perinteinen painekyllästys on edelleen hallitsevassa roolissa modifioidun puun markkinoilla. Muut menetelmät ovat kuitenkin kasvattamassa suosiotaan. Erityisesti lämpöpuu on kasvattanut suosiota paljon viime vuosina.</p>		
<b>Asiasanat</b>  puun modifiointi, lahonsuojaus, lämpökäsittely, painekyllästys, puu-muovikomposiitit		

Author (authors)	Degree	Time
Antti Aimala	Bachelor of Engineering	February 2018
<b>Thesis title</b>		74 pages
History, current state and future of wood modification		
<b>Commissioned by</b>		
South-Eastern Finland University of Applied Sciences		
<b>Supervisor</b>		
Vesa Kankkunen, Senior Lecturer		
<p><b>Abstract</b></p> <p>The aim of this thesis was to research history, the current state and future of different wood modification methods. The purpose of wood modification is to change wood properties for its whole life cycle. With wood modification, it is possible to change, for example, decay resistance, dimensional stability, and strength properties. The main goal of wood modification is to improve decay resistance. Rotten wood is in major role on wood strength properties because even slight decay will lower strength significantly.</p> <p>There are numerous different modification processes. They can be divided into chemical modification, thermal modification, surface modification and impregnation modification. Wood modification processes covered in this thesis are thermal treatment, impregnation by copper and oil products, sodium silicate impregnation, acetylation and furfuration. Wood-plastic composites are also covered. Different wood modification methods give various properties to the wood, so modification method should be chosen by usage and by properties which are desired.</p> <p>Traditional wood impregnation has been in a leading role on improving decay resistance of wood for a long time. Nowadays there is much more focus on which building materials are used because of improved environmental awareness. CCA products were in leading role in the past but their ban has given ample opportunities to other modification methods. Therefore, there are now many different methods which enable to improve wood properties. These methods are also environmentally friendly. The aim of this thesis was to find out if it is possible to replace copper and creosote products with new more environmentally friendly methods. Modification method should give good decay resistance and its price should be competitive.</p> <p>Modification will always raise the price of wood, so it is important to get consumers convinced of the benefits which modification gives. Research will be in leading role, so it is important to focus on extensive and impartial research. Traditional impregnation is still in the leading role in wood modification market. However, other methods are becoming more popular. Especially thermally treated wood has increased its popularity significantly in recent years.</p>		
<b>Keywords</b>		
wood modification, decay protection, thermal treatment, impregnation, wood-plastic composites		

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	PUUN OMINAISUUDET JA NIIDEN VAIKUTUS MODIFIOINTIIN .....	11
2.1	Puun biologinen kestävyys .....	12
2.1.1	Laho.....	12
2.1.2	Bakteerit.....	13
2.1.3	Home ja sinistyminen.....	13
2.1.4	Termiitit ja laivamadot.....	14
2.2	Kosteuseläminen, hygroskooppisuus ja dimensiostabiilisuus.....	14
2.3	Pinta- ja sydänpuun vaikutus modifiointiin .....	16
2.4	Puun lujuusominaisuudet.....	17
3	LÄMPÖKÄSITTELY .....	18
3.1	ThermoWood® .....	18
3.1.1	ThermoWood-prosessi.....	19
3.2	Plato-prosessi .....	21
3.3	Muut lämpökäsittelymenetelmät .....	22
3.4	Lämpökäsittelyn puun ominaisuudet.....	22
3.5	Lämpökäsittelyn energia- ja ympäristönäköhohdat.....	25
4	PAINEKYLLÄSTYS .....	26
4.1	Painekyllästysprosessit.....	27
4.1.1	Bethell- ja Lowry-prosessit.....	28
4.1.2	LOSP-prosessi.....	28
4.1.3	Boulton- ja OHT-prosessit.....	29
4.1.4	Rüping-prosessi.....	29
4.1.5	HT-prosessi .....	30
4.2	Kyllästysaineet.....	30
4.2.1	C-, CC- ja CCA-kyllästeet .....	30
4.2.2	Kreosoottikyllästeet.....	32

4.2.3	Mäntyöljykyllästeet.....	33
4.2.4	Booripohjaiset kyllästysaineet.....	34
4.3	Kestopuun kyllästysluokat .....	34
4.4	Kyllästetyn puutavaran ominaisuudet ja käyttökohteet .....	36
4.5	Kyllästetyn puutavaran taloudelliset näkymät .....	38
5	VESILASIKYLLÄSTYS .....	39
5.1	Vesilasikyllästetyn puun ominaisuudet ja käyttökohteet .....	40
6	KEMIALLINEN MODIFIOINTI.....	42
6.1	Asetylointi .....	42
6.1.1	Astyloidun puun ominaisuudet ja käyttökohteet .....	43
6.2	Furfulointi.....	45
6.2.1	Furfulointiprosessi.....	46
6.2.2	VisorWood® ja Kebony® .....	46
6.2.3	Furfuloidun puun ominaisuudet.....	47
7	PUU-MUOVIKOMPOSIITIT .....	48
7.1	Puu-muovikomposiittien ominaisuudet ja käyttökohteet .....	49
7.2	Puu-muovikomposiittien taloudelliset näkymät .....	51
8	MODIDIFIOIDUN PUUN KÄYTTÖKOhteet .....	52
8.1	Pylväät ja ratapölkkyt.....	52
8.2	Rakennusten ulkoverhous .....	54
8.3	Sillat ja laiturit.....	55
8.4	Terassit.....	55
8.5	Saunasisustus .....	56
8.6	Lattiapinnoitteet .....	57
8.7	Ikkunat ja ovet.....	57
8.8	Puurakentaminen.....	58
9	MODIFIOINTIMENETELMIEN TULEVAISUUS.....	59
10	YHTEENVETO .....	60
10.1	Yhteenveto lämpökäsittelystä .....	63

10.2	Yhteenveto painekyllästyksestä.....	64
10.3	Yhteenveto vesilasikyllästyksestä.....	65
10.4	Yhteenveto asetyloinnista.....	66
10.5	Yhteenveto furfuloinnista .....	67
10.6	Yhteenveto puu-muovikomposiiteista .....	68
LÄHTEET.....		70
KUVALUETTELO .....		74

## 1 JOHDANTO

Puun modifioinnilla tarkoitetaan puun ominaisuuksien muuttamista kemiallisin tai fysikaalisin menetelmin. Tavoitteena on useimmiten tuotteen käyttöiän pidentäminen tai uusien käyttökohteiden löytäminen. Lainmuutosten, tiedon lisääntymisen ja paremman ympäristötietouden vuoksi puun modifioinnin ympäristökuormitukseen kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Uusien kyllästysaineiden ja modifiointimenetelmien kehittämisessä on toiminnan pääpaino siirtynyt ympäristöä vähemmän kuormittavien menetelmien suuntaan. (Väärä & Turunen 2014, 91.)

Monissa puun käyttökohteissa puun luontaiset ominaisuudet ovat sellaisenaan riittäviä. Puun heikot ominaisuudet tulevat esille etenkin ulkokäytössä, jossa erityisesti puun lahoaminen tuottaa ongelmia. Asian ratkaisemiseksi on pyritty kehittämään erilaisia modifioituja puutuotteita, joista esimerkiksi painekyllästys ja lämpökäsittely ovat laajasti käytössä. Toiset modifiointimenetelmät ovat kuitenkin puun käyttäjien keskuudessa jääneet melko tuntemattomiksi ja vähän käytetyiksi. Syynä tähän voi olla se, että tuotteen uutuudesta johtuen sen ominaisuuksia ei tunneta tai sitä on heikosti saatavilla. Myös korkeampi hinta voi rajoittaa modifioidun puun käyttöä varsinkin, jos asiakas ei ole vakuuttunut tuotteen paremmuudesta käsittelemättömään puuhun verrattuna. (Väärä & Turunen 2014, 13.)

Pohjimmiltaan puun modifioinnilla pyritään parantamaan puun luontaisia heikkouksia vaativissa käyttökohteissa. Modifioinnilla parannettavia puun ominaisuuksia ovat esimerkiksi: (Väärä & Turunen 2014, 13.)

- biologinen kestävyys
- palonkestävyys
- mittapysyvyys
- pinnan kovuus
- kulutuskestävyys

Eri modifiointimenetelmät vaikuttavat edellä mainittuihin ominaisuuksiin hyvin eri tavalla. Tämän vuoksi ei modifioinnissa voida käyttää yhtä ainoata menetelmää, vaan valinta tulisi perustua käyttökohteen ja halutun ominaisuuden pa-

rantamisen perusteella. Esimerkiksi painekyllästys kuparikyllästeillä antaa hyvän biologisen suojan, mutta mikäli tavoitteena on mittapysyvyyden parantaminen ei painekyllästys ole oikea valinta. Toisaalta lämpökäsittely parantaa mittapysyvyyttä, mutta lämpökäsitelty puu ei sovellu maa- tai vesikosketukseen. Tämän vuoksi on tärkeää selvittää, mihin käyttökohteisiin eri modifioidut puutuotteet soveltuvat.

Hill (2006, 21-23) luokittelee puun modifioinnin kemialliseen modifiointiin, lämpömodifiointiin, pintamodifiointiin ja modifiointiin kyllästämällä. **Kemiallisessa modifioinnissa** puuhun lisätään kemikaalia, joka reagoi soluseinämän polymeerien hydroksyyliyhdykkeiden kanssa. Kemiallisella modifioinnilla pyritään ensisijaisesti vähentämään puuhun sitoutuvan veden määrää. **Lämpömodifioinnissa** puuta lämmitetään ja tällöin saadaan sen kemiallisessa rakenteessa aikaan haluttuja muutoksia. Puuhun ei siis lisätä mitään kemikaaleja. **Pintamodifioinnilla** voidaan parantaa esimerkiksi liiman tai pintakäsittelyaineen tartuntaa puuhun. Myös säänkestoa, kovuutta ja kulutuskestävyyttä voidaan parantaa. **Modifiointi kyllästämällä** suoritetaan kyllästys sylinterissä, jossa paineen avulla kyllästysaine saatetaan syvälle puun solukkaan. Kyllästyksellä voidaan parantaa mm. puun lahonsuojausta ja palonkestävyyttä. Näitä eri menetelmiä voidaan myös yhdistää toisiinsa.

Modifiointimenetelmiä ja erilaisia kemikaaleja on lukuisia ja niitä kaikkia on mahdotonta saada kattavasti mahtumaan yhteen työhön. Tässä työssä käsitellään painekyllästystä yleisimmillä perinteisillä kyllästeillä, vesilasikyllästystä, lämpökäsittelyä, asetylointia ja furfurointia. Erityisesti kemiallista modifiointia on kokeiltu useilla eri kemikaaleilla ja niillä on saatu hyviä tuloksia. Vain asetylointi ja furfurointi on kehitetty kaupalliselle asteelle ja syynä tähän ovat olleet sopivan tuotantotekniikan puuttuminen tai kemikaalin korkea hinta (Väärä & Turunen 2014, 70). Tämän vuoksi vain asetylointia ja furfurointia käsitellään kemiallisen modifioinnin saralta tässä työssä.

Edellä mainittujen menetelmien lisäksi käsitellään myös puu-muovikomposiitteja (WPC). Puu-muovikomposiitit ovat hyvin poikkeuksellisia puutuotteita, sillä ne ovat puun ja muovin seoksia, joissa puu on yleensä jauhomaisessa muodossa. Ne siis poikkeavat muista edellä mainituista menetelmistä siinä, että modifiointia ei suoriteta sahatavaraa. Puun sijasta voidaan käyttää komposiiteissa vaikkapa pellavaa. Täten voidaan esittää kysymys, että onko puu-



muovikomposiitit todellisuudessa puun modifiointimenetelmä. Joka tapauksessa puu-muovikomposiitit kilpailevat samoista markkinoista kuin modifioitu puu ja niillä uskotaan olevan suurta markkinapotentiaalia tulevaisuudesta, joten on asiallista käsitellä niitä tässä työssä.

Puun modifiointiteollisuus muuttui merkittävästi, kun EU-asetukseen perustuva Suomen lainsäädäntö kielsi CCA-kyllästeen käytön vuoden 2006 syksystä alkaen (Boren 2010, 15). CCA-kyllästeillä saadaan erittäin hyvä suoja lahoa vastaan, mutta niiden sisältämä myrkyllinen arseeni tuottaa eniten terveys- ja ympäristöhaittoja. CCA-kyllästeiden tilalle otettiin käyttöön kuparikyllästeet, mutta niillä ei saada CCA-kyllästeiden tasoista suojaa (Boren 2010, 43). Tämän ja yhä lisääntyvän ympäristötietouden vuoksi pyritään kehittämään uusia ympäristöystävällisempiä menetelmiä, jotka antavat hyvän biologisen suojan lahoa ja hyönteisiä vastaan. Tulevaisuudessa lainsäädäntö voi tiukentua entisestään, joten uusien ympäristöystävällisimpien menetelmien kehittäminen on tarpeen.

Metsäsektori on erittäin tärkeä Suomen kansantaloudelle. Metsäsektori kattaa viidenneksen Suomen vientituloista, koko Suomen bruttokansantuotteesta 5 %, työllistää noin 200 000 suomalaista ja tuottaa uusiutuvasta energiasta Suomessa noin 70 %. Puun käyttöä voitaisiin merkittävästi lisätä, sillä Suomen metsät kasvattavat vuosittain lähes 110 miljoonaa kuutiometriä runkopuuta, josta hyödynnetään noin 60–65 %. (Karjalainen s.a.)

Lisääntyneen ympäristötietouden seurauksena kiinnitetään yhä enemmän huomiota käytettäviin rakennusmateriaaleihin. Puun käyttöä rakentamisessa ja muissa käyttökohteissa halutaan lisätä, koska puun hiilijalanjälki on moniin kilpaileviin materiaaleihin verrattuna pieni (Väärä & Turunen 2014, 11). Puutuotteiden valmistus kuluttaa vain vähän energiaa verrattuna muista materiaaleista valmistettuihin tuotteisiin ja rakenteisiin. Toisin kuin monilla muilla materiaaleilla, suuri osa puutuotteiden valmistuksessa tarvittavasta energiasta perustuu uusiutuviin energialähteisiin. Rakentamisen peruspuutuotteiden valmistuksessa syntyy jopa enemmän energiaa kuin kuluu. Puutuotteiden valmistuksesta syntyy melko vähän hiilidioksidipäästöjä ja puuhun varastoituneen hiilidioksidin määrä on moninkertainen verrattuna puutuotteiden valmistuksen aiheuttamiin päästöihin. Elinkaarensa lopussa puutuotteet voidaan kierrättää tai muuttaa energiaksi. Puusta saatu energia on uusiutuvaa energiaa ja korvaa

fossiilisia polttoaineita. Puu on ainoa rakennusmateriaali, jonka laillinen alkuperä ja kestävä tuotanto voidaan sertifioidusti osoittaa. (Puuinfo, Ympäristö ja resurssitehokkuus s.a.)

Puulla on siis suuri tulevaisuudessa merkittävä potentiaali. Puun käyttöä on mahdollista lisätä ja uusiutuvana luonnonvarana se ei tule loppumaan. Modifioimalla voidaan puuta käyttää useammissa käyttökohteissa, joten modifiointi tulee varmasti tulevaisuudessakin olemaan tärkeässä roolissa puu- ja metsäteollisuudessa. Modifioitukin puutuote on usein ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin esimerkiksi teräs ja betoni. Uusien modifioitujen puutuotteiden avulla voidaan modifioidun puun ympäristöystävällisyyttä parantaa. Ympäristöystävällisyyden näkökulmasta puulla on siis seuraavia vahvuuksia:

- Puu on uusiutuva luonnonvara.
- Puutuotteiden valmistuksessa syntyy vähäiset hiilidioksidipäästöt.
- Puu sitoo hiiltä.
- Valmistuksessa syntyviä sivutuotteita voidaan käyttää energian tuotannossa.
- Puu voidaan kierrättää ja käyttää energiaksi.
- Metsiä hoidetaan kestävä kehityksen mukaisesti.
- Metsien vuotuinen kasvu on Suomessa suurempaa kuin poistuma, joten hakkuita on mahdollista lisätä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, onko perinteistä painekyllästystä mahdollista korvata uusilla modifiointimenetelmillä. Kupari- ja kreosoottikyllästeillä saadaan biologista kestävyyttä huomattavasti parannettua, joten pääpainona onkin selvittää modifioinnin vaikutukset biologiseen kestävyYTEEN. Tarkoituksena on siis selvittää, voidaanko uusilla ympäristöystävällisemmillä menetelmillä saada puulle hyvä biologinen suoja ja niiden tulisi olla myös hinnaltaan kilpailukykyisiä. Modifioinnilla voidaan saada myös monia muitakin ominaisuuksia parannettua, joten on tärkeää selvittää kaikki modifioinnilla saatavat hyödyt, jotta saadaan tuotteiden hinta-laatusuhde selville. Perinteisellä painekyllästyksellä parannetaan lähinnä vain biologista kestävyyttä, mutta muilla menetelmillä saadaan monia muitakin ominaisuuksia parannettua, joten niiden mahdolliset käyttökohteet ovatkin huomattavasti laajemmat.

## 2 PUUN OMINAISUUDET JA NIIDEN VAIKUTUS MODIFIOINTIIN

Sytä puun modifioinnille on useita. Yleisesti ottaen modifioinnin päätarkoitus on parantaa puun biologista kestävyyttä lahoa ja hyönteisiä vastaan. Modifioinnilla voidaan vaikuttaa dimensiostabiilisuteen eli mittapysyvyyteen kosteusvaihtelussa. Puu laajene ja kutistuu merkittävästi kosteuden vaihtuessa ja kosteusvaihtelun suuruus vaihtelee suuresti eri suunnissa. Modifioinnilla voidaan parantaa puun lujuutta, kovuutta ja kulutuksenkestävyyttä. Myös palonkestoa voidaan parantaa modifioinnilla. Tässä osiossa käydään läpi puun eri ominaisuuksia ja selvitetään, miten ne vaikuttavat modifiointiin.

Puulla on monia hyviä ominaisuuksia kilpaileviin materiaaleihin verrattuna. Rakenteista saadaan keveitä, sillä puu on suhteellisen lujaa tiheyteensä nähden. Puu on myös helposti työstettävää ja sen lämmöneristyskyky on hyvä. Hygroσκοoppisena eli vettä imevänä materiaalina se tasaa huonetilan kosteutta. Lisäksi puu on ekologinen materiaali, sillä se on uusiutuva ja se voidaan elinkaarensa lopuksi hävittää polttamalla. Puu on toisaalta myös haasteellinen materiaali. Haasteelliseksi sen tekevät mm. seuraavat ominaisuudet: (Väärä & Turunen 2014, 10.)

- Puu on **hygroσκοoppista** eli se sitoo itseensä kosteutta ympäröivästä ilmasta.
- Kosteusvaihtelut puussa aiheuttavat **kosteuselämistä**.
- Suuri kosteus heikentää puun **biologista kestävyyttä**. Se on siis altis laholle, homeelle, bakteereille ja hyönteisille.
- Puun kosteus vaikuttaa puun kimmo- ja **lujuusominaisuuksiin**, mikä pitää ottaa huomioon puurakenteiden suunnittelussa.
- Puu on **anisotrooppista**, eli monet sen ominaisuuksista vaihtelevat eri suunnissa.
- **Palavana materiaalina** sen käyttö on rajoitettua tietyissä rakenteissa.
- Puun **lujuus, kovuus ja kulutuskestävyys** eivät välttämättä ole riittäviä vaativissa käyttökohteissa.
- Luonnon materiaalina puu on **epähomogeenista** ja sisältää vikoja, jotka heikentävät sen käytettävyyttä.

Jotta puun kilpailukykyä muihin materiaaleihin (betoni, tiili, teräs, muut metallit, muovit) verrattuna voidaan parantaa, täytyy edellä mainittuihin haasteisiin pysyä vastaamaan. Puun heikot ominaisuudet tulevat esille erityisesti ulkokäytössä ja yksi ratkaisu on rakenteellisin keinoin vähentää kyseisiä haittoja. Vaihtoehtoisesti puun ongelmallisia ominaisuuksia voidaan parantaa modifioimalla puuta. Puun käyttöön tulee kuitenkin suhtauduttava realistisesti, sillä puuta ei pidä väkisin käyttää sellaisissa käyttökohteissa, joissa sillä ei ole mahdollisuuksia menestyä. (Väärä & Turunen 2014, 11-13.)

## **2.1 Puun biologinen kestävyys**

Puun biologiseen kestävyyteen vaikuttaa pääasiassa laho. Biologiseen kestävyyteen vaikuttaa myös mm. hyönteiset, jotka käyttävät ravinnokseen puuta. Tässä osiossa käydään läpi muutamia merkittävimpiä biologiseen kestävyyteen vaikuttavia seikkoja.

### **2.1.1 Laho**

Laholla tarkoitetaan lahottajasienten kemiallisesti tai fysikaalisesti muuttamaa puuta. Lahosta on syytä kielellisesti erottaa lahottaja, jolla tarkoitetaan lahottavaa sientä. Lahottajat jaetaan usein valko-, rusko- ja katkolahottajiin. Laboratorioissa lahoaste määritellään tavallisesti massan vähenemisen perusteella. Lahon aiheuttama massan aleneminen on absoluuttisesti suurinta tiheässä puussa, mutta tiheyteen suhteutettuna se on suurinta nopeakasvuissa kevyessä puussa. (Kärkkäinen 2007, 324-329.)

Useat valko- ja ruskolahottajat ovat tehokkaita lahottajia. Laboratorio-oloissa tehokas valkolahottaja voi aiheuttaa yli 50 % puuaineen massan häviämiestä. Valko- ja ruskolahottajat vaativat melkoista alkukosteutta voidakseen iskeytyä puuaineeseen, mutta ovat alkuun päästyään erittäin tehokkaita. Katkolahottajat ovat hyvin hitaita lahottajia, mutta voivat toimia äärimmäisissäkin olosuhteissa kuten kuivassa ja läpimärässä ympäristössä. Katkolahottajat pysyvät toimimaan jopa painekyllästetyssä puussa. Yleensä ruskolahottajia tavataan havupuissa ja valkolahottajia lehtipuissa. (Kärkkäinen 2007, 324-326.)

Laho heikentää merkittävästi puun lujuusominaisuuksia. Vähäinenkin laho heikentää erityisesti iskutaivutuslujuutta. Jo 5 % vähennys massasta voi heikentää iskutaivutuslujuutta 50–80 %. Myös taivutuslujuus alenee paljon. Karkeasti voidaan arvioida, että massan vähentyessä lahon vaikutuksesta 10 % taivutuslujuus alenee 60–70 %. Massan vähentyessä 10% alenee: kohtisuora puristuslujuus syitä vastaan 60 %, syiden suuntainen puristuslujuus 40 %, vetolujuus syiden suunnassa 50–60 % ja kovuus sekä leikkauslujuus 20 %. Lahoamisen alkuvaiheessa lujuuden aleneminen on voimakkainta ja lujuuden aleneminen on merkittävästi nopeampaa kuin massan menetys edellyttäisi. (Kärkkäinen 2007, 327.)

### **2.1.2 Bakteerit**

Bakteerit pystyvät hajottamaan yleisiä puussa olevia aineita. Ne voivat hitaasti hajottaa jopa selluloosaa. Bakteerit voivat elää tavallisesti erittäin kosteissa olosuhteissa. Vaikka bakteerit hajottavat selluloosaa hitaasti sieniin verrattuna, pitkäaikainen vesivarastointi voi heikentää lujuutta 10–15 %. Bakteerit voivat edistää katkolahon syntyä ja leviämistä. Bakteerit pystyvät hajottamaan kreosoottia ja sietämään jopa CCA-kyllästeitä. Näin ollen niiden toiminta voi raivata tietä katkolahottajille. (Kärkkäinen 2007, 339.)

### **2.1.3 Home ja sinistyminen**

Home ei pysty tunkeutumaan puun pintaa syvemmälle, joten se ei ole puun lujuuden kannalta haitallista. Homeen levittämät itiöt ovat kuitenkin haitallisia terveydelle. Tämän vuoksi homeeseen on aina suhtauduttava vakavasti. Puun sinistyminen rinnastetaan usein virheellisesti puun homehtumiseen, mutta sinistyminen on sinistäjäsiementen aiheuttamaa värjäntymistä, joka ulottuu myös syvälle puun rakenteeseen. Sinistyminen ei vaikuta oleellisesti puun lujuuteen. (Puuinfo, Kosteusteknisiä ominaisuuksia s.a.)

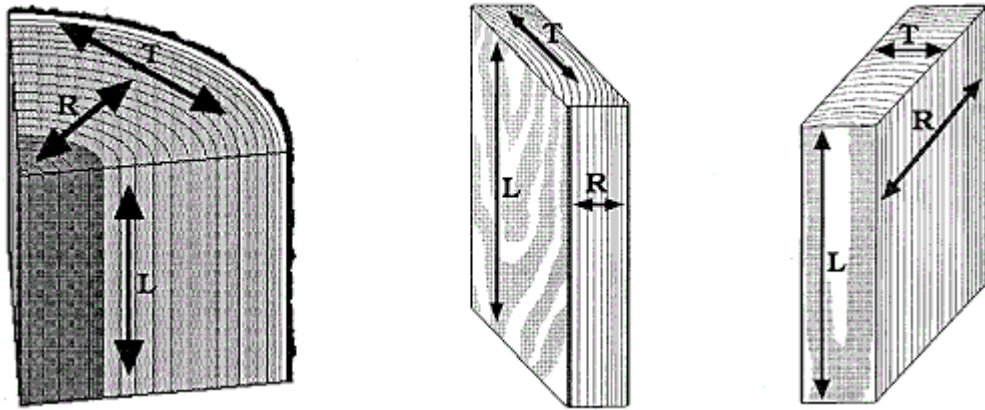
#### **2.1.4 Termitit ja laivamadot**

Puun suojaus termiiteiltä on nykyisin Suomessakin tärkeää, sillä puutuotteita viedään hyvin laajasti ympäri maailmaa. Termitit aiheuttavat ongelmia enimmäkseen eteläisen pallonpuoliskon alueella, mutta ne ovat jo levinneet Ranskaan ja raportoituja tapauksia on myös pohjoisemmistakin Euroopan maista (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 19-4). Termitit ovat puulle erittäin tuhoisia, sillä ne pystyvät käyttämään ravintonaan selluloosaa (Kärkkäinen 2007, 345). Laho puu saattaa houkutella tropiikissa termiittejä, sillä laho parantaa niiden ravinnonsaantimahdollisuuksia ja muuttaa termiiteille haitallisia aineita sopivampaan muotoon (Kärkkäinen 2007, 329).

Vedessä elävistä lajeista merkittävintä tuhoa aiheuttaa laivamadot eli mato-simpukat, jotka elävät vain suolaisessa vedessä. Ne käyttävät ravintonaan yksinomaan puuta. Laivamatoa kestävä puuaine tuhoutuu suotuisissa oloissa jo muutamassa viikossa. Mikään puulaji ei kestä kaikkia laivamatolajeja. Pohjoismaisista puulajeista tammi antaa parhaan suojan laivamatoja vastaan, mutta vähäisellä kestolla ei ole käytännön merkitystä. Laivamatoja esiintyy myös Itämeressä, muttei paljoa vähäsuolaisuudesta johtuen. (Kärkkäinen 2007, 345-346.)

#### **2.2 Kosteuseläminen, hygroskooppisuus ja dimensiostabiilisuus**

Puun kutistuminen ja paisuminen kosteuden vaihtuessa on tunnetusti anisotrooppista. Anisotrooppisuudella tarkoitetaan sitä, että kutistuminen ja paisuminen ovat eri suuruisia eri suuntiin (kuva 1). Pituuden (syiden) suuntainen kutistuminen ja paisuminen tuoreesta puusta absoluuttisen kuivaksi on puulajista riippuen 0,1–0,3 %. Säteen suuntainen kutistuminen on 3–6 % ja tangentin suuntainen kutistuminen on 6–12 %. Säteen suuntainen kutistuminen on siis noin puolet tangentin suuntaisesta ja pituuden suuntainen kutistuminen on selvästi pienempää. (Kärkkäinen 2007, 195.)



Kuva 1. Kosteuselämiseen vaihtelee suuresti eri suunnissa. T on tangentin suuntainen, R on säteen suuntainen ja L pituuden suuntainen.

Puun syiden kyllästymispisteellä (PSKP) tarkoitetaan puun kosteutta silloin, kun soluseinämät ovat vedellä kyllästetyt, mutta soluonteloissa ei esiinny vapaata vettä. Kun puun kosteus vähenee alle kyllästymispisteen, alkaa puu kutistua. Vastaavasti puun kastuessa laajeneminen loppuu kyllästymispisteessä. Puun syiden kyllästymispiste vaihtelee suuresti eri puulajien välillä ja kyllästymispisteeseen vaikuttaa myös lämpötila. PSKP on männyllä, kuusella ja koivulla noin 30 % (Kärkkäinen 2007, 191). (Puuinfo, Kosteusteknisiä ominaisuuksia s.a.)

Puu on hygroσκοoppinen eli vettä imevä aine, joka pystyy imemään ympäröivää vesihöyryä. Jokaista lämpötilaa ja ilman suhteellista kosteutta vastaa puuaineen tasapainokosteus, jolloin siihen tulevan ja siitä poistuvan vesihöyryn määrä on yhtä suuri. (Kärkkäinen 2007, 177.)

Usein modifioinnilla pyritään pienentämään puun tasapainokosteutta. Tällöin puuhun sitoutuu vähemmän vettä, mikä vähentää kosteuselämistä ja suojaa laholta. Dimensiostabiilisuudella tarkoitetaan puun mittapysyvyyttä kosteusvaihtelussa. Dimensiostabiilisuus on yksi mahdollinen syy puun modifioinnille kohteissa missä vaaditaan hyvää mittapysyvyyttä. Pienentämällä tasapainokosteutta saadaan myös lahonsuojaominaisuuksia parannettua, sillä lahottaj sienet vaativat toimiakseen yleisesti ottaen melko suurta kosteutta.

### 2.3 Pinta- ja sydänpuun vaikutus modifiointiin

Kaupallisessa kielenkäytössä sydänpuulla tarkoitetaan puun rungon sisintä osaa, joka poikkeaa säännönmukaisesti ulkokehästä tummemman värinsä vuoksi (kuva 2). Vaalea rungon osa on pintapuu eli manto. Puun fysiologian kannalta on tarkoituksenmukaisempaa määritellä sydänpuu sellaiseksi puunosaksi, jossa kaikki solut ovat kuolleita perinnöllisten syiden vuoksi. Vastavasti pintapuu määritellään puunosaksi, josta löytyy eläviä soluja. Useilla puulajeilla tuore pintapuu on selvästi kosteampaa kuin sydänpuu. (Kärkkäinen 2007, 116.)



Kuva 2. Euroopanmarjakuusen tumma sydänpuu ja sitä ympäröivä vaalea pintapuu.

Pinta- ja sydänpuun erot tulevat esiin erityisesti kyllästämisessä. Käytännössä kyllästyksessä saadaan kyllästettyä vain pintapuu (Väärä & Turunen 2014, 28). Sydänpuulla on kuitenkin usein varsin hyvä luontainen suoja lahoa vastaan. Männyn sydänpuun lahonkeston oletetaan johtuvan pääasiassa pinosylviinistä, mutta vaikutusmekanismi ja muiden kemiallisten aineiden vaikutus on vielä epäselvä. Sydänpuussa voi olla kuitenkin merkittävää vaihtelua. Lahonkestävintä männyn sydänpuuta on sen uloin osa. Joskus männyn sydänpuun keskiosa kestää lahoa lähes yhtä huonosti kuin pintapuu. (Kärkkäinen 2007, 330.)

Männyllä ja monilla muillakin puulajeilla pinta- ja sydänpuun välissä on muutama millimetrin vahvuinen vaihettumisvyöhyke, joka on kuivaa kuin sydänpuu,



mutta kemiallisesti muuttumatonta. On esitetty, että juuri tämä osa olisi lahon-suojauksen kannalta hankalin osa. Vaihettumisvyöhyke on vaikeasti kyllästet-tävä kuten sydänpuu, mutta lahoa kestävämpänä kuten pintapuu. (Kärkkäinen 2007, 116.)

## **2.4 Puun lujuusominaisuudet**

Puun modifioinnissa voi olla tavoitteena parantaa puun lujuusominaisuuksia, kovuutta ja kulutuksenkestävyyttä. Pinnan kovuus ja kulutuksenkestävyys ovat tärkeitä ominaisuuksia erityisesti lattiamateriaalina käytettävälle puulle. Jotkin modifiointimenetelmät voivat heikentää puun lujuusominaisuuksia. Tämä on tärkeää ottaa huomioon erityisesti, mikäli puuta käytetään kantavissa raken-teissa. Mikäli puun modifioinnissa on tavoitteena parantaa puun biologista kestävyyttä, tulee ottaa huomioon, ettei lujuusominaisuudet heikkene käsitte-lyssä liikaa.

Käytännössä puun lujuusominaisuudet ovat ilmiönä hyvin monimutkaisia, sillä puu ei tavallaan ole ainetta vaan rakenne. Lujuusominaisuudet vaihtelevat suuresti eri suunnissa ja niihin vaikuttaa myös mm. kappaleen tiheys ja kevät ja syyspuun osuus. Toisaalta mikroskooppisella tasolla lujuuteen vaikuttaa eri-laiset kemialliset sidokset. Muita puun lujuuteen vaikuttavia asioita ovat mm. puulaji, kasvunopeus, kosteus, lämpötila, viat (oksat ym.), sekä pinta- ja sy-dänpuu osuus. Puun kovuus voidaan määritellä puun ominaisuudeksi vastus-taa kiinteiden kappaleiden pakottamista puun sisään. Käytännössä kovuuden voi arvioida usein riittävällä tarkkuudella puun tiheyden perusteella. (Kärkkäi-nen 2007, 217-223.)

Koska puun ominaisuudet voivat vaihdella eri tekijöistä riippuen hyvinkin pal-jon, puuta on tarkoituksenmukaista lajitella käyttötärpeen mukaan. Lajittelussa voidaan erottaa kaksi pääasiallista tarkastelukriteeriä, jotka ovat puun ulko-näkö ja lujuustekniset ominaisuudet. Puun laatu- ja lujuuslajittelussa noin 90 % laatu-kriteereistä kohdistuu puun oksiin. Lujuuslajittelu voidaan tehdä joko silmävaraisesti tai koneellisesti. (Puuinfo, lujuusteknisiä ominaisuuksia s.a.)

### 3 LÄMPÖKÄSITTELY

Puun pinnan polttaminen tekee puusta kestävämpää ulkokäytössä. Tämä on ollut tiedossa jo vuosisatojen ajan ja jo viikingit käyttivät tätä menetelmää ulkorakennelmissaan. Tieteellistä tutkimusta puun lämpökäsittelystä on tehty jo 1930-luvulla Saksassa. Suomessa on tehty tutkimusta 1990-luvulta alkaen. Tarkimmat ja kattavimmat tutkimukset aiheesta on tehnyt VTT eli Teknologian tutkimuskeskus Suomessa. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 1-1.)

Puun teollista lämpökäsittelyä harkittiin Yhdysvalloissa jo 1910-luvulla ja 1940-luvulla tunnettiin patentoitu kuumastabiloitu puu. Kuumastabiloitu puu ei johtanut kuitenkaan kaupalliseen tuotantoon. Tämä johtui luultavasti kuumapuristimen heikosta tuottavuudesta ja korkeista yli 300°C:n lämpötiloista, mikä alensi iskutaivutuslujuuden erittäin pieneksi. (Kärkkäinen 2007, 207-208.)

Nykyisin puun pintaa harvemmin poltetaan. Pinnan polttamista käytetään kuitenkin vielä pienissä määrin esimerkiksi puusepänteollisuudessa. Lämpökäsittely suoritetaan nykyisin kuivauskamarissa, jossa puuta käsitellään jopa yli 200 °C:ssa useiden tuntien ajan. Käsittelyllä pyritään parantamaan mm. puun sään- ja lahonsuojaominaisuuksia sekä mittapysyvyyttä. Lämpökäsittelymenetelmiä on useita erilaisia. Tässä työssä käsitellään pääasiassa suomalaista ThermoWood-menetelmää, mutta myös muitakin käytössä olevia menetelmiä käydään hyvin lyhyesti läpi. Lämpökäsittelystä puusta käytetään myös nimitystä lämpöpuu.

#### 3.1 ThermoWood®

ThermoWood®-tavaramerkin käyttöoikeus on ainoastaan Lämpöpuuyhdistys ry:n jäsenillä. Lämpöpuuyhdistys ry. on perustettu vuonna 2000 ja nykyisin yhdistyksessä on 18 jäsenyritystä seitsemästä maasta. Lämpöpuun käyttö on kasvanut tasaisesti ja lisääntyy koko ajan. Lämpöpuuyhdistyksen tehtävä on edistää ThermoWood-tuotteiden käyttöä. (Lämpöpuuyhdistys ry. 2017.)

Vuonna 2016 ThermoWood®-tuotteita valmistettiin lähes 180 000 kuutiota. 2000-luvun alussa tuotanto oli noin 20 000 kuutiota ja vuodesta 2011 alkaen tuotanto on ollut yli 100 000 kuutiota vuodessa. Tuotanto on siis kasvanut rajusti koko 2000-luvun ajan. Pääasiallinen markkina-alue on EU-maat. Vuonna

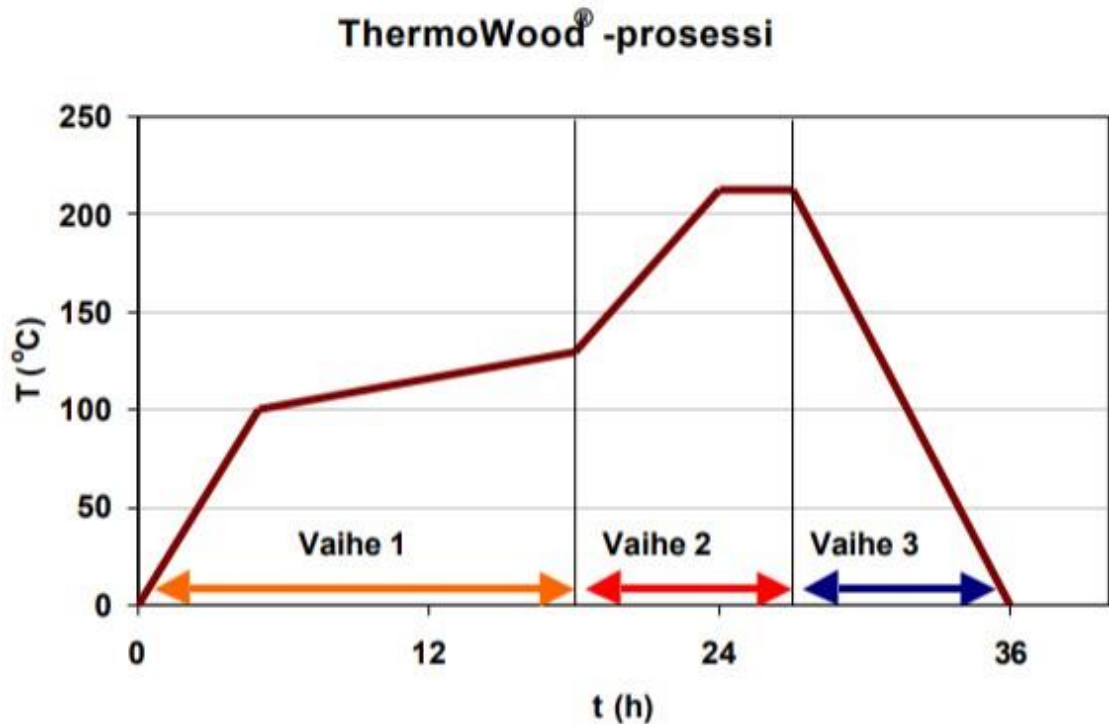
2016 tuotannosta Suomessa käytettiin 5% ja muihin EU-maihin vietiin 79% tuotannosta. (ThermoWood tuotantotilastot 2016.)

ThermoWoodilla on kaksi yleistä tuoteluokkaa, joiden nimet ovat Thermo-S ja Thermo-D. Thermo-S-tuotteille dimensiostabiilisuus on keskeinen ominaisuus. Thermo-S-luokan puun keskimääräinen kosteuseläminen tangentin suunnassa on 6–8 %. Thermo-S on standardin EN 113 mukaisesti luokiteltuna melko kestävä eli se kuuluu luontaiselta lahonkestävyydeltään luokkaan 3. Thermo-D-tuotteille biologinen kestävyys on keskeinen ominaisuus. Thermo-D-luokan puun keskimääräinen kosteuseläminen tangentin suunnassa on 5–6 %. Thermo-D on standardin EN 113 mukaisesti luokiteltuna kestävä eli se kuuluu luontaiselta lahonkestävyydeltään luokkaan 2. Havu- ja lehtipuille on omat luokituksensa. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 4-1.)

### **3.1.1 ThermoWood-prosessi**

ThermoWood-tuotteita valmistetaan VTT:n kehittämällä menetelmällä. Puumateriaali lämmitetään vähintään 180 °C:n lämpötilaan ja samalla sitä suojataan höyryn avulla. Höyry suojaa puuta ja vaikuttaa myös puussa tapahtuviin kemiallisiin muutoksiin. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 1-1.)

ThermoWood®-prosessi (kuva 3) voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen: (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 1-3.)



Kuva 3. Kaaviokuva ThermoWood-prosessista. Vaaka-akselilla aika ja pystyakselilla lämpötila. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 2-1.)

- **Vaihe 1. Lämpötilan kohottaminen ja kuumakuivaus**
  - Kamarin lämpötila nostetaan nopeasti noin 100 asteeseen lämmön ja höyryn avulla. Tämän jälkeen lämpötilaa nostetaan tasaisesti 130 asteeseen, jonka aikana kuumakuivaus tapahtuu ja puun kosteuspitoisuus laskee lähes nollaan. Kuivausvaihe on prosessin pisin vaihe. Kuivausvaiheen pituuteen vaikuttavat puun alkukosteus, puulaji ja sahatavaran paksuus. Kuivausvaiheen kesto aika on 4–15 tuntia.
- **Vaihe 2. Lämpökäsittely**
  - Kun kuumakuivaus on tehty, uunin sisälämpötila nostetaan välille 185–215 °C, ja kun tavoiteltu lämpötila on saavutettu, se pidetään vakiona 2–3 tunnin ajan loppukäyttösovelluksesta riippuen.
- **Vaihe 3. Tasaannutus**
  - Viimeisessä vaiheessa lämpötilaa lasketaan vesisuihkutusjärjestelmien avulla. Kun lämpötila on 80–90 °C, tehdään uudelleen kostutus, jossa puun kosteuspitoisuus saadaan käytettävälle 4–7

-%:n tasolle. Puuta jäähdytetään hallitusti, koska suuri ero lämpötiloissa puun ja ulkoilman välillä aiheuttaa halkeilua. Tasaannutusvaiheen kesto on 5–15 tuntia ja se riippuu käsittelylämpötilasta ja sahatavarasta.

Raaka-aineena voidaan käyttää tuoretta tai uunikuivattua puuta. Mikäli prosessi käynnistetään tuoreella puulla, voidaan puu kuivata nopeaa kuuma-kuivausprosessia hyödyntämällä. Nopea kuivuminen on mahdollista, koska värimuutoksista ei tarvitse huolehtia ja pihka poistuu puusta joka tapauksessa lämpökäsittelyprosessin aikana. Menetelmä soveltuu havu- ja lehtipuun käsittelyyn, mutta prosessi on optimoitava jokaista puulajia varten erikseen. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 2-1.)

Suomessa lämpökäsitellään mäntyä, kuusta, koivua ja haapaa. Myönteisiä kokemuksia on saatu myös Radiata-männyn, saarnin, lehtikuusen, tervalepän, pyökin ja eukalyptuksen lämpökäsittelystä. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 1-2.)

### 3.2 Plato-prosessi

Plato-prosessi juontaa juurensa teknologiaan, jonka kehitti alun perin Royal Dutch Shell, joka tunnetaan paremmin nimellä Shell. Plato-prosessi kehittyi sivutuotteena tutkimuksessa biomassan muuntamisessa nestemäiseksi polttoaineeksi. Plato-prosessi jakautuu neljään eri vaiheeseen. (Hill 2006, 179-180.)

- **Vaihe 1. Hydrotermolyysivaihe**
  - Puu lämmitetään 150–180 asteeseen lämmön ja höyryn avulla. Lämmitys tapahtuu 6–8 baarin paineessa 4–5 tunnin ajan. Käytettävän puun alkukosteus on 14–20 % ja kosteus laskee vain hieman tämän vaiheen aikana.
- **Vaihe 2. Kuivaus**
  - Puu kuivataan kuivaamossa haluttuun kosteuteen (8–10 %). Tämä vaihe kestää viidestä päivästä kolmeen viikkoon.
- **Vaihe 3. Lämpökäsittely**
  - Puu lämpökäsitellään kuivassa olosuhteessa lämpötilan vaihdellessa 150–190 asteen välillä. Lämpökäsittelyvaihe kestää 12–16

tuntia ja puun kosteus tämän vaiheen jälkeen on alle yhden prosentin.

- **Vaihe 4. Tasaannutus**

- Kuivaamon kosteutta nostetaan, jotta puu saadaan haluttuun 4–6 prosentin käyttökosteuteen. Tämä vaihe kestää noin kolme päivää.

Plato-prosessissa käsittelyajat ovat siis huomattavasti pidemmät kuin ThermoWood-prosessissa, joten tuotantokapasiteetti on tällöin pienempi.

### 3.3 Muut lämpökäsittelymenetelmät

Ranskassa on käytössä kaksi lämpökäsittelymenetelmää. Retification-menetelmässä kuivattu puutavara käsitellään 180–250 °C:n lämpötilassa typen toimiessa suojakaasuna. La Bois Perdure -menetelmässä käytetään tuoretta puuta, joka ensin kuivataan ja sitten lämpökäsitellään 200–230 °C:ssa vesihöyryn toimiessa suojakaasuna. Saksassa käytetään Menz Holz -menetelmää, jossa lämpökäsittely tehdään kasvis- tai pellavaöljykeittona 180–220 °C:n lämpötilassa ja prosessi kestää 18 tuntia. (Väärä & Turunen 2014, 40.)

### 3.4 Lämpökäsitellyn puun ominaisuudet

Lämpökäsitellyllä männyllä ja kuusella ei ole suuria eroja, mutta niillä on luontaisia eroja tiheydessä ja oksatyypeissä (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 1-4). Lämpökäsitellyn puun laatuun vaikuttaa keskeisesti raaka-aineeksi käytettävän puun laatu. Puun kuumentaminen saa aikaan kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin useita pysyviä muutoksia. Ominaisuuksien muuttuminen johtuu pääasiassa hemiselluloosien termisestä hajoamisesta. Lämpökäsittelyn seurauksena tapahtuu seuraavia muutoksia: (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 3-1.)

- Kosteuseläminen pienenee.
- Biologinen kestävyys paranee.
- Väri tummuu.
- Puusta poistuu erilaisia uuteaineita.
- Massa pienenee.

- Tasapainokosteus laskee.
- pH laskee.
- Lämmöneristyskyky kasvaa.
- Jäykkyys ja lujuusominaisuudet muuttuvat.

Lämpökäsittelyn jälkeen puussa on selvästi alhaisempi määrä hemiselluloosia. Tällöin lahottajien hyödynnettävissä olevaa ravintoa on huomattavasti vähemmän ja osittain tästä syystä lämpökäsittely puu kestää lahottajasieniä huomattavasti paremmin kuin modifioimaton puu. Hemiselluloosien hajoamisen yhteydessä vettä sitomaan kykenevien hydroksyyliyhymien pitoisuus laskee ja tällöin puusta tulee myös dimensiostabiilimpaa kuin käsittelemättömästä puusta. Hemiselluloosaketjun katkeaminen ei kuitenkaan alenna puun lujuutta niin kuin selluloosaketjujen katkeaminen tekisi. Puun ainesosista ligniini kestää lämpöä parhaiten. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, neljäs luku: 2-3.)

Lämpökäsittely puu ei ole yhtä tiheää kuin käsittelemätön puu. Tämä johtuu käytännössä käsittelyn aikana tapahtuvasta massan menetyksestä. Tiheys pienenee pääsääntöisesti käytettäessä korkeampia käsittelylämpötiloja, mutta hajonta on kuitenkin mittauksissa suurta. Puumateriaalin lujuudella ja tiheydellä on yleensä voimakas korrelaatio. Tämän vuoksi lämpökäsittely heikentää lujuusominaisuuksia, mutta paino-lujuus-suhde saattaa pysyä lähes muuttumattomana. Kosteuspitoisuuden ollessa alle puun syiden kyllästymispisteen lujuusominaisuudet ovat riippuvaisia kosteuspitoisuudesta. Kun lämpökäsittelyn puun tasapainokosteus on pienempi, sen kosteuspitoisuus on tietyissä olosuhteissa alhaisempi ja siten sen lujuusarvot voivat olla korkeampia kuin tavallisella puulla. Suurin osa testeistä on tehty kuitenkin virheettömillä koekappaleilla ja oksat voivat muuttaa lujuusominaisuuksia, joten ThermoWood-tuotteita ei suositella kantaviin rakenteisiin. Lämpökäsittelyllä voidaan kuitenkin puun kovuutta parantaa ja kovuusarvo kasvaa käsittelylämpötilan kasvaessa. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, neljäs luku: 4-9.)

Tyypillisesti lämpökäsittelyllä voidaan parhaimmillaan vähentää puun kosteuselämistä 40 %. Joskus kosteuselämistä on saatu vähennettyä jopa 80 %. Lämpökäsittelyn vaikutus kosteuselämiseen vaihtelee suuresti eri puulajien välillä. Lämpökäsittelyssä ilmeisesti syntyy molekyylien ristiin sitoutumista, mikä vähentää puun hygroskooppisuutta ja sitä kautta lisää mitta- ja muotopysyvyyttä kosteuden vaihdellessa. (Kärkkäinen 2007, 208-209.)

Lämpökäsittely parantaa lahonkesto-ominaisuuksia useilla puulajeilla, mutta sillä ei voida saavuttaa lähellekään maakosketukseen vaadittavaa tasoa. Lämpökäsittely antaa merkittävän suojan ruskolahoa vastaan. Lämpökäsittely ei suojaa termiittejä vastaan, mutta se antaa kuitenkin joitakin tuholaishyönteisiä vastaan suojaa. Lämpökäsittelyn puun lahonkeston paranemisen on todettu johtuvan puuhun sitoutuneen veden määrän vähenemisestä, hydroksyyliyhymien määrän vähenemisestä ja puun ainesosien muuntamisesta vähemmän lahonalttiiksi. (Viitaniemi & Jämsä 1996, 24; ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, neljäs luku: 17-19; Kärkkäinen 2007, 333.)

Lämpökäsittelyllä voidaan vaikuttaa puun väriin ja siihen vaikuttavat käsittelylämpötila ja -aika. Mitä korkeampi lämpötila, sitä tummempi ulkoasu (kuva 4). Periaatteessa väri voidaan hyvin toistaa prosessissa. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 23-4.)



Kuva 4. Lämpökäsittelyn männyn väri. Käsittelylämpötilat 120-220°C ja lämpökäsittelyaika 3 tuntia. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 24-4.)



Lämpökäsittelyssä käsitellyn erän laadun tarkastaminen on tärkeää. Lämpökäsittelyn suurimmat riskit liittyvät väärään loppukosteuteen ja sahatavaran sisähalkeamiin. Yleisimmät lämpökäsittelyn laatuvirheet ovat: (Möller & Otranen 1999, 107.)

- pinta- ja sisähalkeamat
- väärä loppukosteus ja/tai kosteusjakauma
- sahatavaran muodonmuutokset
- oksien irtoilu ja halkeilu
- värivirheet

Lämpökäsittely alentaa vain hieman palonkestävyyttä (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 13-4). Lämpökäsittelyn puun pintalaudoissa voi esiintyä käytönaikaisena ongelmana tikkujen ja kokonaisten vuosilustojen irtoamista (Kärkkäinen 2005, 116).

Lämpökäsittelyn puun työstäminen edellyttää hieman enemmän tarkkuutta verrattuna käsittelemättömään puuhun, koska se on lujuusominaisuuksistaan johtuen alttiimpaa mekaanisille vaurioille jatkojalostuksessa (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 1-5). Lämpökäsittelyn puun kiinnitys edellyttää ruostumattomien kiinnikkeiden käyttöä ja lämpökäsittelyn puun pienemmästä halkaisulujuudesta johtuen tulee lautojen kiinnityksessä noudattaa valmistajan ohjeita. Lämpökäsittely puu on maalattavissa normaalin puun tapaan. (Väärä & Turunen 2014, 14.)

### **3.5 Lämpökäsittelyn energia- ja ympäristönäköhohdat**

ThermoWood®-prosessi on ympäristöystävällinen, koska siinä ei käytetä kemikaaleja. Prosessissa käytetään vain vettä ja lämpöä. Energiaa kuluu pääasiassa vain puun kuivaukseen, joka kuluttaa 80 % käytetystä lämpöenergiasta. ThermoWood®-prosessin energian tarve on vain noin 25 % korkeampi kuin tavallisen puunkuivausprosessin ja sähköntarve on sama kuin tavallisessa kuivauksessa. Puu on joka tapauksessa kuivattava, joten lämpökäsittely ei merkittävästi korota energiakustannuksia. Prosessissa vapautuu puun uuteaineita, jotka voidaan hajuhaittojen estämiseksi käsitellä esimerkiksi polt-

tamalla. Prosessissa syntyvän jäteveden kiinteät osat voidaan erotella selkeytysaltaassa ja loput käsitellä vedenpuhdistamoilla. (ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 2-3.)

Lämpökäsittelyn eri prosessivaiheiden aikana haihtuu suuria määriä erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC), joista aiheutuu lämpökäsittelylaitoksille tunnusomainen haju. Erityisesti lämpökäsittelyvaiheen aikana haihtuu suuria määriä orgaanisia yhdisteitä. Puutteellisella poistokaasujen käsittelyllä hajuhaitat voivat muodostua merkittäväksi ja aiheuttaa ympäristösuojelulaissa mainittua ympäristön pilaantumista. Hajuhaittaa pidetään kaikkein merkittävimpänä ympäristöhaittana lämpökäsittelyprosessissa. Furfuraalia haihtuu etikkahapon ohella eniten puun lämpökäsittelyprosessin aikana ja furfuraalin uskotaan olevan merkittävässä roolissa hajuhaittojen aiheuttajana (Kiukas ym. 2007, 70). Havu- ja lehtipuista vapautuu määrältään ja laadultaan erilaisia yhdisteitä, mikä johtuu niiden erilaisesta kemiallisesta rakenteesta (Kiukas ym. 2007, 11). Käsittelylämpötilalla ja sen kestolla on suuri vaikutus siihen, kuinka paljon yhdisteitä vapautuu (Kiukas ym. 2007, 13, 16).

Osa lämpökäsittelyprosessissa haihtuvista yhdisteistä lauhtuu nestemäiseen olomuotoon (Kiukas ym. 2007, 12). Lauhteiden pH voi happojen vaikutuksesta laskea hyvinkin alhaiseksi. Nestemäisten päästöjen pH arvo on 2–3. Lauhteiden happamuus voi aiheuttaa ongelmia erityisesti pienen kokoluokan jätevedenpuhdistamoille. Tällöin lauhteiden neutralointi voi olla tarpeen. (Kiukas ym. 2007, 16.)

VOC- ja hajukaasujen puhdistamiseen on olemassa monia eri tapoja. Puhdistimien vuosittaiset käyttökustannukset suomalaisissa lämpökäsittelylaitoksissa vaihtelivat käsittelymenetelmän mukaan vuonna 2006 1000–20 000 euron välillä. Ongelmia puhdistuslaitteissa ovat aiheuttaneet tervan kertyminen laitteistoihin, kaasun epätasainen kuorma ja korkea kosteuspitoisuus. (Kiukas ym. 2007, 26.)

#### **4 PAINEKYLLÄSTYS**

Painekyllästyksessä kyllästysaine saatetaan puun sisään kyllästyssylinterissä paineen avulla. Kyllästysaine imeytetään painekäsittelyn avulla syvälle puun

solukoihin, joissa se yleensä polymeroituu ja kiinnittyy puun soluseinämiin tai soluonteloihin (Väärä & Turunen 2014, 9). Täten kyllästykseen teho kestää huomattavasti pidemmän aikaa kuin pelkkä aineen siveleminen pintaan. Paine-kyllästyksellä parannetaan yleensä puun biologista kestävyttä ja tämän vuoksi painekyllästetty puu on tarkoitettu vaativaan ulkokäyttöön. (Väärä & Turunen 2014, 26.)

Painekyllästyksessä käytetään lähes pelkästään mäntyä, koska kylläste saadaan helposti tunkeutumaan männyn pintapuuhun. Käytännössä männyllä saadaan kyllästettyä vain pintapuu. Männyn sydänpuun lahonkestävyys on kuitenkin luontaisesti varsin hyvä, joten käytännössä sen kyllästämisellä ei saavutettaisi merkittävää hyötyä. Kuusen kyllästäminen on hankalaa sen puu-aineen huonon läpäisevyyden takia ja koivu ei sovellu kyllästykseseen, koska se on luontaisesti helposti lahoava puu. (Väärä & Turunen 2014, 28.)

Perinteisesti painekyllästyksessä on käytetty CCA-kyllästeitä, jotka sisältävät kuparia, kromia ja arseenia. CCA-kyllästeiden käyttökielto EU:n alueella on johtanut siihen, että nykyisin kyllästysaineissa tehoaineena käytetään vain kuparisuoloja. Kreosoottia käytetään kyllästysaineena vain ammattikäytössä erityäin vaativissa olosuhteissa. (Väärä & Turunen 2014, 28.)

#### 4.1 Painekyllästysprosessit

Painekyllästyksessä on käytössä lukuisia eri prosesseja. Väärä ja Turunen (2014, 26) kuvaavat useimpien prosessien sisältävän seuraavat vaiheet:

- **1. Alkutyhjiö**
  - Kyllästyssylinteriin asetetaan 80–85 prosentin alipaine ja tämä vaihe kestää 15–60 minuuttia. Alipaineen avulla saadaan suurin osa puun solukossa olevasta ilmasta pois, mikä antaa tilaa kyllästysaineelle.
- **2. Kyllästyssylinterin täyttö kyllästysaineella**
- **3. Painejakso**
  - Kylläste tunkeutuu puuhun 10–16 baarin ylipaineen avulla ja tämä vaihe kestää 1–3,5 tuntia.
- **4. Lopputyhjiö**
  - Paine lasketaan 80–85 prosentin alipaineeseen. Tässä vaiheessa ylimääräinen kyllästysaine poistetaan kyllästyssylinteristä varastosäiliöön.

#### 4.1.1 Bethell- ja Lowry-prosessit

Bethell-prosessia käytetään yleensä vesiliukoisilla kyllästeillä, jolloin kemikaalia voidaan liuottaa veteen haluttu määrä. Pohjoismainen mänty imee käyttöliuosta 400–600 litraa/m<sup>3</sup> ja mitä kuivempaa puu on, sitä enemmän se imee kyllästettä. Puuhun imeytyvän kemikaalin määrää voidaan säätää liuosväkyyden avulla kohtuullisen tarkasti. Öljyjä, vahoja ja muita veteen liukenemattomia kyllästeitä voidaan myös käyttää, mutta yleensä se johtaa liian suureen pitoisuuteen puussa (400–600 kg/m<sup>3</sup>), jolloin lopputuotteesta tulee kallis ja painava. Myös tahraavuus lisääntyy suuremmilla pitoisuuksilla. (Väärä & Boren 2012, 14-15.)

Bethell-prosessissa imetään aluksi alkutyhjiö kyllästys sylinteriin. Tämän jälkeen avataan venttiilit käyttöliuossäiliöön, jolloin alipaineen vaikutuksesta kyläste siirtyy käyttöliuossäiliöstä kyllästys sylinteriin. Sitten muodostetaan kyllästys sylinteriin yleensä noin 12 baarin paine ja paineajan päättymisen jälkeen liuos siirretään käyttöliuossäiliöön takaisin. Lopuksi kyllästys sylinteriin imetään mahdollisimman voimakas lopputyhjiö, jonka tarkoituksena on poistaa kaikki puusta mahdollisesti ulostihkuva kyläste. Näin estetään valumat kuivauksessa, varastoinnissa, kuljetuksessa ja loppukäytössä. Mitä korkeampi lämpötila lopputyhjiössä on, sitä kuivempi tuote saadaan aikaan. (Väärä & Boren 2012, 14.)

Lowry-prosessi poikkeaa Bethell-prosessista siten, että alkutyhjiötä ei imetä vaan käyttöliuos siirretään siirtopumpulla normaalipaineessa kyllästys sylinteriin. Tällöin puun sisälle jää ilmaa, joten kyllästettä imeytyy puuhun noin puolet vähemmän kuin Bethell-prosessissa eli 200–300 litraa/m<sup>3</sup>. (Väärä & Boren 2012, 15.)

#### 4.1.2 LOSP-prosessi

LOSP tarkoittaa kyllästekemikaaleja ja -menetelmiä, jotka viedään puuhun Bethell- tai Lowry-prosessilla orgaanisten liuottimien avulla. Käyttöliuos ei siis sisällä vettä. Kyllästyksen jälkeen liuottimet yleensä haihdutetaan puusta hallitusti kyllästys sylinterissä ja kerätään talteen. Liuottimina käytetään yleensä alkoholia, tärpättiä tai vastaavaa liuotinta. (Väärä & Boren 2012, 16.)

#### 4.1.3 Boulton- ja OHT-prosessit

Boulton-prosessissa tuore puu laitetaan kyllästyssylinteriin, joka täytetään kuumalla kyllästysaineella. Käytännössä kyllästysaineena on aina jokin öljy. Tavoitteena on lämmittää puita kuumalla öljyllä ja tämän jälkeen poistaa puusta ylimääräistä kosteutta alipaineen avulla ennen varsinaista kyllästystä. Lämmitysvaihe kestää 1–24 tuntia riippuen dimensiosta ja tavoitelämpötilasta. Kreosootilla tyypillinen lämpötila on 80–90 °C. Jos lämpötila pysyy veden kiehumispisteen yläpuolella, vesi höyrystyy eikä jää kyllästysaineeseen. (Väärä & Boren 2012, 16.)

Oil Heat Treatment -käsittelyssä (OHT) eli öljylämpökäsittelyssä tavoitteena on lämpökäsitellä puu yli 140-asteisen öljyn avulla. Puu voi olla tuoretta, puoli-kuivaa (kosteus noin 28 %) tai kuivaa. Mikäli puu on tuoretta, OHT-prosessin alussa käytetään yleensä Boulton-prosessia poistamaan puusta ylimääräistä vettä ja lämmittämään puuta. Puiden lämmitys on tärkeää, sillä jopa 200°C lämpötilaero puun ja öljyn välillä voi aiheuttaa halkeamia. Puun laadun kannalta tärkein vaihe OHT-prosessissa on kuitenkin jäähdytys, sillä liian nopea ja hallitsematon jäähdytys johtaa halkeiluun. OHT-prosessissa on tärkeää, että sylinterin ja puun sisäpaine on koko ajan veden kiehumispainetta korkeammalla. (Väärä & Boren 2012, 16-17.)

#### 4.1.4 Rüping-prosessi

Rüping-prosessia käytetään yleensä öljykyllästeillä. Pitoisuudeksi riittää yleensä noin 100 litraa/m<sup>3</sup>, koska öljyt ovat kalliita ja niiden tehokkuus on hyvä. Jäämää säädelään erityisesti alkupaineen avulla. Rüping-prosessissa muodostetaan aluksi neljän baarin alkupaine ja tämän jälkeen öljy siirretään kyllästyssylinteriin. Seuraavaksi muodostetaan noin 12 baarin paine ja paineajan päättymisen jälkeen liuos siirretään takaisin käyttösäiliöön. Lopuksi kyllästyssylinteriin imetään mahdollisimman voimakas lopputyhjö. (Väärä & Boren 2012, 17.)

#### 4.1.5 HT-prosessi

Paineastiassa tehtävän lämpökäsittelyn (Heat Treatment = HT) tavoitteena on lämpökäsitellä normaali tai kyllästetty puu yli 140 asteessa puun ja mahdollisen kemikaalin reaktioiden edistämiseksi. Puiden esilämmitys on tärkeää, koska ilman lämmitystä puuhun voi syntyä halkeamia. On tärkeää, että sylinterin ja puun sisäpaine on koko ajan veden kiehumispainetta korkeammalla. Puussa oleva vesi höyrystyy, jos puun sisäpaine laskee nopeasti. Höyrystyvä vesi voi puusta ulos pyrkiessään rikkoa puun solukon. (Väärä & Boren 2012, 18.)

#### 4.2 Kyllästysaineet

Vesipohjaisilla kuparia, booria tai muita tehoaineita sisältävillä kyllästeillä käsitelty puutavara on väriltään vaalean vihreää tai ruskeaa (kuva 5). Kyseisistä kyllästysmenetelmistä käytetään nimitystä suolakyllästys. Kreosoottiöljyllä kyllästetty puutavara on väriltään tumman ruskeaa. Öljypohjaiset kyllästeet ovat tavallisesti värittömiä. Kyllästysaineita voi sävyttää myös eri väreihin. (RT 21-10880: 2006, 3.)



Kuva 5. Kuparikyllästettyä kestopuuta on saatavilla ruskeana ja vaalean vihreänä.

##### 4.2.1 C-, CC- ja CCA-kyllästeet

C-, CC- ja CCA-kyllästeet ovat kuparipohjaisia kyllästeitä. Kyllästeiden koostumus on seuraava:

- CCA-kyllästeet sisältävät kuparia, kromia ja arseenia.
- CC-kyllästeet sisältävät kuparia ja kromia.
- C-kyllästeet sisältävät kuparia.

EU-asetukseen perustuva Suomen lainsäädäntö kielsi CCA-kyllästeen käytön vuoden 2006 syksystä alkaen. Muualla käytössä olevaa CC-kyllästettä ei ole ainakaan toistaiseksi hyväksytty käytettäväksi Suomessa. (Boren 2010, 15.)

C- ja CC-kyllästeillä on mahdollista saavuttaa lähes sama käyttöikä kuin CCA-kyllästeillä, kun kuparijäämä on 2–3 kertaa suurempi. Käytännössä erityisesti kuparikyllästeillä on vaikeaa saada 2–3 kertaa suurempaa jäämää ja tasaista tunkeumaa. Tämä johtuu siitä, että tällöin tulee käyttää huomattavasti väkevämpää liuosta, jonka viskositeetti on suurempi. Lisäksi kupari suotautuu puussa pintakerrokseen voimakkaasti, mikä estää kyllästeen tunkeutumisen syvemmälle puuhun. (Boren 2010, 43.)

Näiden aineiden lisäksi voidaan käyttää myös useita erilaisia tehoaineita. Kuparipohjaisten kyllästeiden kokonaismäärä analysoidaan yleensä kuparijäämän perusteella. Esimerkiksi kun kuparin osuus kyllästeen tehoaineena on 20 %, niin tällöin 2 kg:n kuparijäämän perusteella puussa on kyllästettä yhteensä 10 kg. (Boren 2010, 36.)

Kuparikyllästysaineisiin lisätään tehoaineita, jotta ne toimisivat paremmin ruskolahoa vastaan. Nämä tehoaineet liukenevat kuitenkin pois C-kyllästetystä puusta voimakkaasti. Paras suoja lahoa vastaan saadaan yhdistämällä kupari-kyllästeeseen suoja-aineita, jotka toimivat myös ruskolahoa vastaan ja vähentävät suoja-aineiden liukenemista puusta. Esimerkiksi CC-kyllästeiden parempi teho perustuu juuri näihin seikkoihin. (Boren 2010, 34.)

Vaikka kyllästeiden ympäristöystävällisyyttä on saatu parannettua ja terveyshaittoja pienennettynä CCA-kyllästeiden käyttökiellolla, ei kuparikyllästeet ole täysin haitattomia, sillä kupariyhdisteet ovat nieltynä lievästi myrkyllisiä. Kromiyhdisteet ovat syövyttäviä, hapettavia ja lisäävät syöpäsairauden vaaraa. Kaikkein haitallisin aine CCA-kyllästeissä on arseeni, joka aiheuttaa hermosto- ja sisäelinvaurioita sekä lisää syöpäsairauden riskiä. (Lahontorjuntayhdistys Ry 1985, 3.)

Perinteisissä kuparikyllästeissä käytetään vesiliukoista kuparia, joka saadaan aikaiseksi esimerkiksi amiinien tai ammoniakkin avulla. Nykyisin on kehitetty kuparipohjainen kyllästysaine, jossa veteen sekoitetaan lähes nanokokoisia kuparihiukkasia. Kyseisestä tuotteesta käytetään yleisnimitystä mikronisoitu kupari. Mikronisoidun kuparin hyvä puoli on se, että käytetty kupari ei ole vesiliukoinen, joten sen korrosoiva vaikutus on vähäinen. Tutkimustulosten perusteella mikronisoidun kuparin antama suoja lahoa vastaan vaihtelee hyvin paljon riippuen valmisteesta, puulajista, pitoisuudesta ja partikkelikoosta. (Boren 2010, 45.)

#### **4.2.2 Kreosoottikyllästeet**

Kreosoottikyllästeet ovat öljypohjaisia kyllästeitä. Hyväksytyjä kreosoottityyppejä ovat WEI Type B ja WEI Type C, joista C-tyyppin kreosootti on miedompi tuoksultaan. Kreosoottityyppejä on paljon, mutta niiden saatavuus on rajallinen. Heikosta saatavuudesta johtuen erikoisempien kreosoottien hinta on korkeampi kuin yleisimmin saatavilla oleva tyyppi B. (Boren 2010, 30.)

Kreosootin teho lahoa vastaan ei juuri enää kasva, kun sen pitoisuus puussa ylittää  $75 \text{ kg/m}^3$ . Kreosootin pääongelmia ovat haju, tahraavuus ja öljyn tihkuminen ulos puusta. Edes kreosoottipitoisuuden pienentäminen ei poista kokonaan näitä ongelmia. Kreosootin tihkumista puun pintaan voidaan vähentää lisäämällä öljyn joukkoon kuivikkeita (esim. rautaoksideja, karbonaatteja) tai seostamalla kreosoottiöljyä nykyistä pienempiä määriä huomattavasti jäykemmän ja suojaa antavan kasviöljyn joukkoon (esim. pellavaöljy tai mäntyöljy). (Boren 2010, 30-32.)

Kreosoottia käytetään vain erittäin vaativissa kohteissa. Kreosootilla kyllästettyjen sähköpylväiden on todettu säilyvän Suomen oloissa jopa 80 vuotta. Ympäristö- ja terveysriskien vuoksi kreosootin käyttö on rajoitettu vain ammattikäyttöön. Käytännössä kreosoottia käytetään vain ratapölkkyihin ja pylväisiin. (Väärä & Turunen 2014, 28.)



#### 4.2.3 Mäntyöljykyllästeet

Mäntyöljy on luonnonöljy, jota saadaan selluteollisuuden sivutuotteena. Se on ympäristölle vaaratonta ja sillä on luontaisesti puuta suojaavia ja vettä hylkiviä vaikutuksia. Mäntyöljykäsittely tehdään öljylämpökäsittelyllä (OHT-käsittely) öljyn lämpötilan ollessa yli 140 °C. (Väärä & Turunen 2014, 66.)

Puun mäntyöljykyllästystä on tutkittu aktiivisesti 1990-luvun alusta alkaen, mutta laajamittaista teollista tuotantoa ei kuitenkaan ole toistaiseksi syntynyt. Ongelmana on ollut erityisesti raakamäntyöljytuotteiden tihkuminen puun pintaan, mikä aiheuttaa hajua ja tahraavuutta. Mäntyöljykyllästyksen valmistuskustannukset ovat noin 200 €/m<sup>3</sup>, mikä on noin kaksi kertaa kreosoottikyllästystä kalliimpaa (Boren 2010, 51). Mäntyöljykyllästetyn puun voi hävittää polttamalla. (Boren 2010, 46.)

Raakamäntyöljyyn liittyvät pitkäaikaiset kenttäkokeet ovat osoittaneet sen toimivuuden lahoa vastaan. Raakamäntyöljyn tulokset pitoisuudella 150–200 kg/m<sup>3</sup> viittaavat sen toimivan ruskolahoa ja katkolahoa vastaan lähes yhtä hyvin kuin kreosootti NTR A-luokassa, kun tuloksia tulkitaan lujuuden suhteen. Painohäviön perusteella raakamäntyöljy ei kuitenkaan toimi yhtä hyvin kuin kreosootti tai CC-kylläste lahoa vastaan. Tämä johtuu siitä, että osa raakamäntyöljyn komponenteista on lahottajasienille kelpaavaa ravintoa ja osa yhdisteistä haihtuu tai on vesiliukoisia. Osa puun painohäviöstä johtuukin juuri näistä asioista. Öljymäärän lisääminen parantaa jonkin verran tuloksia. Kosken (2008, 61) mukaan mäntyöljyn pitoisuuden on oltava yli 400 kg/m<sup>3</sup>, jotta sillä saadaan CCA- ja kreosoottikyllästeiden tasoinen lahonsuoja. (Boren 2010, 46-47.)

Raakamäntyöljyn lisäksi on olemassa myös muitakin mäntyöljytuotteita. Uusilla mäntyöljyillä voidaan saada parempi lahonsuoja kuin puhtaalla raakamäntyöljyllä. Raakamäntyöljyn koostumus vaihtelee myös hyvin paljon. Erilainen valmistusmenetelmä vaikuttaa öljyn koostumukseen ja sen käyttäytymiseen kyllästyksessä. Uusilla kyllästysmenetelmillä voidaan vähentää raakamäntyöljyn ja muiden mäntyöljyjen tihkumista puun pintaan. (Boren 2010, 51.)

#### 4.2.4 Booripohjaiset kyllästysaineet

Booripohjaiset kyllästysaineet toimivat hyvin lahoa ja termiittejä vastaan heti kyllästyksen jälkeen, mutta merkittävänä ongelmana on niiden voimakas liukoisuus veteen. Tutkimusten mukaan vanhentamiskokeiden jälkeen boorilla käsiteltyjen koekappaleiden lahonkesto ei poikkea paljoakaan käsittelemättömistä. Edes boorikyllästyksen jälkeinen mäntyöljykyllästys ei estä kokonaan boorin liukenemista pois puusta. Tutkimusten perusteella boorikyllästyksen ja mäntyöljykyllästyksen yhdistäminen antaa hyvän suojan lahoa vastaan. (Boren 2010, 60.)

#### 4.3 Kestopuun kyllästysluokat

Kestopuu® tavaramerkin laatukriteerit edellyttävät, että kyllästysaine on tehokas ja turvallinen, pitoisuudeltaan riittävä ja että se imeytyy kyllästysprosessissa puun laholle alttiin pintapuukerroksen läpi. Kestopuun tuotanto on laadunvalvonnan alaista ja laadunvalvonnasta vastaavat laaduntarkastusyhteisöt Inspecta Sertifiointi Oy ja Finotrol Oy. (Kestopuuteollisuus Ry. s.a.)

Kyllästetty puutavara jaetaan seuraaviin luokkiin: **M, A, AB ja B** (taulukko 1). Luokitus perustuu EN-standardeissa EN 335-1<sup>1</sup>, EN 351-1<sup>2</sup> ja Pohjoismaiden puunsuojausneuvoston asiakirjassa NTR dokumentti nr.1:1998<sup>3</sup> esitettyyn puunsuoja-aineen tunkeutumaan sekä esitettyihin käyttöluokkiin. Luokitus edellyttää, että: (RT 21-10880: 2006, 2.)

- Puunsuoja-aine on hyväksytty kyseiseen luokkaan.
- Puulaji on hyväksytty kyseiseen luokkaan.
- Tuotantolaitos on hyväksytty tuottamaan kyseisen luokan puutavaraa.
- Kyllästetyn puutavaran laatua valvotaan.

Taulukko 1. Kyllästysluokan vaatimukset ja tyypilliset kyllästysaineet (RT 21-10880: 2006, 2.)

<b>Kyllästysluokka</b>	<b>tunkeuma</b>	<b>tyypillinen suoja-aine</b>
<b>M</b>	suoja-aine tunkeutunut pinta-puun läpi	kreosoottiöljy
<b>A</b>	suoja-aine tunkeutunut pinta-puun läpi	CU-tuotteet ja kreosoottiöljy
<b>AB</b>	suoja-aine tunkeutunut pinta-puun läpi	CU-tuotteet ja metallivapaat tuotteet
<b>B</b>	vähintään 6 mm:n lateraalinen ja vähintään 50mm:n pituus-suuntainen tunkeuma pinta-puussa	orgaaniset öljypohjaiset tuotteet

Suomessa kyllästetään pääsääntöisesti vain mäntyä A- ja AB-luokkiin. A-luokan Kestopuussa kyllästysainetta on enemmän, minkä vuoksi sen käyttöikä vaativissa kohteissa on huomattavasti AB-luokkaa pidempi. Kyllästysaineen määrä A-luokan kyllästetyssä pintapuussa on kyllästeestä riippuen 16-36 kg/m<sup>3</sup> ja AB-luokan pintapuussa 8-19 kg/m<sup>3</sup>. (Paine-kyllästetyn kestopuun käyttöturvallisuusohje 2011, 1-2.)

Luokituksen täyttääkseen puunsuoja-aineiden on oltava Pohjoismaiden puunsuojausneuvoston (NTR) hyväksymiä ja suoja-aineilla on oltava myös Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) hyväksyntä. Luokitus koskee pääasiassa vain mäntyä, mutta myös muita puulajeja voidaan hyväksyä NTR:n toimesta. Kestopuun käyttöesimerkkejä eri käyttöluokissa on lueteltu taulukossa 2. (RT 21-10880: 2006, 2-4.)

Taulukko 2. Kyllästetyn puutavaran käyttöesimerkkejä eri käyttöluokissa (RT 21-10880: 2006, 4.)

Käyttöluokka	Käyttöalue	Esimerkkejä	Suosittel-tava kyl-lästys-luokka
1	Puu kuivassa sisäilmastossa	Huonekalut ja sisäverhoukset	Kyllästys ei tarpeellinen
2	Puu, joka ei ole suoraan alttiina sään vaikutukselle eikä ole kosketuksessa maahan, mutta jonka kosteuspitoisuuden lyhytaikainen nousu on mahdollista.	Kattotuolit ja katetussa ulkotilassa oleva puu.	Kyllästys ei tarpeellinen
3	Säälle ja kondenssikosteudelle alttiina oleva puu, joka ei ole kosketuksessa maahan eikä pysyvästi vedessä ja joka sijaitsee siten, että vaurioituneet osat on helppo vaihtaa eivätkä aiheuta tapaturmavaaraa.	Ikkunat ja ulko-ovet.  Sateelta suojaamattomat ulkovarusteet, piharakenteet, pihalaatat, yms., jotka eivät kosketa maahan.	<b>B</b>  <b>AB</b>
4	Puu, joka on jatkuvassa kosketuksessa maahan tai makeaan veteen tai meriveteen, jonka suolapitoisuus on enintään 0,7 % (kaikki Suomen rannikkovedet) tai on erityiselle säärasitukselle alttiina, ja jonka lujuuden ei henkilöturvallisuussyistä sallita heikentyvän tai jonka vaihtaminen on vaikeaa.	Sähkö- ja puhelinpylväät, ratapölkkyt. Laiturien ja siltojen kantavat rakenteet. Aidan ja portin pylväät, ulkopuoliset rakenteet kuten portaat, parvekerakenteet, yms.	<b>A</b>
5	Puu suolaisessa merivedessä ja puu, jolle asetetaan erityisiä kestävyys- ja lujuusvaatimuksia.	Satama- ja venelaiturit, peruspaalut, ym.	<b>M</b>

#### 4.4 Kyllästetyn puutavaran ominaisuudet ja käyttökohteet

Kyllästetyn puutavaran käyttöikä on käyttökohteesta ja kyllästysluokasta riippuen 3-5 kertaa pidempi kuin kyllästämättömällä puulla. A-kyllästysluokan puutavaran käyttöikä on maakosketuksessa 4-5 kertaa pidempi kuin kyllästämättömällä puulla. Esimerkkejä käyttökohteista A- ja AB-kyllästysluokan kestopuulle on esitetty taulukossa 3. (RT 21-10880: 2006, 3.)

Taulukko 3. Esimerkkejä käyttökohteista A- ja AB-luokan kestopuulle. (Painekyllästetyn kestopuun käyttöturvallisuusohje 2011, 3.)

<b>AB-luokan kestopuun käyttökohteita</b>	<b>A-luokan kestopuun käyttökohteita</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• terassit, patiot, pergolat (kansilaudoitus)</li> <li>• aitalaudoitukset</li> <li>• hiekkalaatikot</li> <li>• kukkalaatikot</li> <li>• pihakalusteet</li> <li>• leikkikenttävarusteet</li> <li>• ulkoverhoukset</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• terassit, patiot, pergolat (rungot)</li> <li>• laiturit</li> <li>• portaat</li> <li>• aitalolpat</li> <li>• pylväät</li> <li>• pilarit (maakosketuksessa)</li> <li>• ratapölkyt</li> <li>• meluaidat</li> <li>• kaiteet</li> <li>• alajuoksut</li> <li>• pengerrykset</li> <li>• sillat, ajosillat</li> </ul>

Kreosootti- ja suolakyllästeet suojaavat hyvin valko- ja ruskolahottajia vastaan. Edellytyksenä kuitenkin on, että kyllästeiden jääminen puuhun on riittävän suuri. Katkolahoa vastaan kyllästeiden antama suoja on heikompi ja erityisen heikoksi on osoittautunut kyllästettyjen lehtipuiden lahonkestävyys. Tämä johtuu luultavasti siitä, ettei kylläste tunkeudu soluseinämään yhtä hyvin kuin havupuilla. (Kärkkäinen 2007, 332.)

Kyllästäessä puuta tavanomaisilla suolakyllästeillä lujuus säilyy likimain samana. Tietyt lujuusominaisuudet saattavat jopa nousta. Suolakyllästeillä kyllästäessä on kuitenkin iskutaivutuslujuuden todettu alenevan. Tosin männyllä ja pyökillä on havaittu puristuslujuuden kohoavan suolakyllästeiden vaikutuksesta. (Kärkkäinen 2007, 232.)

Kyllästettyä puuta ei saa käyttää sisätiloissa eikä rakenteissa, jotka ovat jatkuvassa kosketuksessa talousveden tai elintarvikkeiden kanssa. Kyllästettyä

puutavaraa voidaan työstää tavanomaisilla puuntyöstömenetelmillä. Kyllästetyn puun halkaisemista tulee kuitenkin välttää, sillä tällöin paljastuu kyllästymätöntä sydänpuuta. Katkaisu- ja työstöpinnat on hyvä käsitellä siveltävällä puunsuoja-aineella. Kyllästettyä puuta ei saa polttaa kotitulisijoissa. Käytöstä poistettu kyllästetty puutavara ja työstöjätteet tulee toimittaa kierrätykseen. Kyllästetty puutavara hyödynnetään turvallisesti energiaksi kyllästetyn puun käsittelyyn erikoistuneissa jätteenpolttolaitoksissa. (Painekyllästetyn kestopuun käyttöturvallisuusohje 2011, 1-3.)

Kyllästetyn puutavaran kiinnityksessä tulee käyttää kiinnikkeitä, ruuveja ja nauloja, jotka kestävät kyllästysaineiden sisältämien metallisuolojen ja kosteiden käyttöolosuhteiden aiheuttamat korroosio vaikutukset. Erityisen tärkeää on, että yhdessä käytettävät kiinnikkeet, ruuvit ja naulat ovat kaikki samaa materiaalia. Liimaukseen suositellaan säänkestäviä liimoja. (RT 21-10880: 2006, 4.)

Kyllästetty puu voidaan pintakäsitellä vesiliukoisilla tai liuotinpohjaisilla puunsuoja-aineilla, öljyillä tai vahoilla. Parhaimman tuloksen antavat puoliläpäisevän kalvon muodostavat pintakäsittelyaineet. Säilytetyt puunsuoja-aineet ja öljyt estävät puun harmaantumisen. (Väärä & Turunen 2014, 18.)

#### **4.5 Kyllästetyn puutavaran taloudelliset näkymät**

Kyllästetyn sahatavaran tuotannosta suurin osa päättyy yksittäisten kuluttajien loppukäyttöön, siksi kuluttajien tavoittaminen on ensiarvoisen tärkeää. Toinen kyllästysteollisuudelle tärkeä kohderyhmä on puutavaran jälleenmyyjät, joiden kautta lähes kaikki kyllästetty puu kulkeutuu kuluttajille. Suomessa Kestopuuteollisuus Ry. pyrkii tuotetiedoillaan helpottamaan kyllästetyn puutavaran myyntiä. Yhdistys hallinnoi myös kyllästetyn puun kierrätysyhtiötä Demolite Oy:tä. (Tähkälä & Tomperi 2015, 8.)

Suomessa toimii tällä hetkellä 20 kyllästyslaitosta. Kyllästyslaitosten määrä on vähentynyt, sillä vuonna 1985 kyllästyslaitoksia oli noin 80 (Lahontorjuntayhdistys Ry 1985, 5). Vuonna 2016 Suomessa tuotettiin teollisesti kyllästettyä puuta yhteensä 290 000 kuutiometriä. Kyllästetyn sahatavaran osuus oli 230

000 ja pylväiden 45 000 kuutiometriä. Ratapölkkyjä kyllästettiin 15 000 kuutiometriä. Kyllästetystä sahatavarasta yli 90 % ja pylväistä noin 30 % toimitettiin kotimaahan. Suomessa sahatavara kyllästetään pääsääntöisesti kuparikyllästeillä. Pylväiden kyllästämisessä käytetään samoja kuparivalmisteita tai kreosoottiöljyä. Ratapölkkyt kyllästetään kreosoottiöljyllä. (Kyllästetyn puutavaran tuotanto Suomessa vuonna 2016.)

Kestopuun myyntimäärä on pysynyt useana vuonna 220 000 kuutiometrin molemmin puolin. Kyllästettyjen pylväiden kotimaan myynti on vähentynyt vuosi vuodelta. Suomen pylväsmyynti on noin 15 000 kuutiota, kun se vielä 10 vuotta sitten oli yli kaksinkertainen. Suurin syy tähän on verkkoyhtiöiden lainsäädännöstä johtuvat päätökset sähkölinjojen rakentamisesta maan alle. Pylvästuotannon epävarmuutta lisää myös se, että vienninmäärien ennakointi on muuttunut yhä hankalammaksi kohdemaiden epävakaiden poliittisten olosuhteiden takia. Suomi on kuitenkin edelleen yksi Euroopan suurimmista kyllästettyjen pylväiden viejämaista. (Tähkälä & Tomperi 2015, 8.)

Puun modifiointia kyllästämällä on tutkittu melko vähän muihin modifiointimenetelmiin verrattuna, mutta tulevaisuudessa tullaan varmasti tutkimaan lisää uusia menetelmiä ja kyllästysaineita (Hill 2006, 173). Perinteisille kupari- ja kreosoottikyllästeille pyritään etsimään uusia ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja. Yksi tällainen voi olla seuraavaksi läpikäytävä vesilasikyllästys.

## 5 VESILASIKYLLÄSTYS

Vesilasi on piiksidin ja natriumoksidin vesiliuos jossa piin ja natriumin moolipitoisuudet voivat vaihdella. Myös vesilasipitoisuus eli konsentraatio liuoksessa voi vaihdella. Vesilasi on terveydelle ja ympäristölle vaaratonta, hajutonta ja palamatonta. Ainoa terveysriskinä voi olla liuosta käsitellessä korkea pH pitoisuus. Vesiliuosten pH riippuu piidioksidin ja natriumoksidin moolisuhteesta sekä liuoksen konsentraatiosta (Väärä & Boren 2012, 19). Vesilasikyllästys voidaan toteuttaa Bethell-kyllästysprosessilla. Vesilasia käytetään yleisesti mm. hammastahnoissa, pesuaineissa, liimoissa ja paperissa. (Boren 2010, 57-59.)

Vesilasi on tunnettu jo pitkään puun kyllästysaineena ja sitä on tutkittu paljon. Sen käytössä on kuitenkin ollut merkittävänä ongelmana saada täyttä tai riittävän syvää tunkeumaa puuhun. Erityisesti happamilla puulajeilla (havupuut) ei ole saatu riittävää tunkeumaa väkevilla 3,3 moolisuhteisilla vesilasiliuoksilla. Tämän vuoksi mm. kovuus-, kulutuksenkestävyys, lahon-, palon- ja säänkesto-ominaisuudet ovat jääneet liian heikoiksi. Käytettäessä pieni moolisuhteista vesilasia saadaan helpommin täysi tunkeuma puuhun, mutta pieni moolisuhteinen vesilasi on liukoisempi. Tämä aiheuttaa vesilasin huuhtoutumiseen pois puusta ja heikentää puun ominaisuuksia korkeamman pH:n vuoksi. Kylästyksen jälkeen vesilasi kovettuu puun huokosissa veden haihtumisen seurauksena ja polymeroituu reagoidessaan puusolukossa olevien happamien karboksyyliyhymien kanssa. Polymeroitumista voidaan edistää lämpökäsittelyllä, metallisuoloilla, happamilla öljyillä sekä erilaisilla hapoilla. (Boren 2010, 58.)

### **5.1 Vesilasikyllästetyn puun ominaisuudet ja käyttökohteet**

Vesilasin käytöllä puun kyllästyksessä on todettu saavutettavan monia etuja. Vesilasi suojaa selluloosakuidut mekaanisesti ja estää palamisreaktion hapen kanssa. Lisäksi vesilasi parantaa puun kovuutta, vähentää kosteuden imeytymistä ja parantaa dimensiostabiilisuutta. Myös puun tiheys kasvaa, kestävyys lahoa vastaan paranee ja naulojen, ruuvien ja muiden kiinnikkeiden pitokyky paranee (Väärä & Turunen 2014, 57). Vesilasi suojaa myös pieneliöiltä ja vähentää homehtumisriskiä ulkokäytössä. (Väärä & Boren 2012, 19.)

Vesilasikyllästetystä puusta ei ole paljon käyttökokemuksia sen uutuudesta johtuen. Vesilasikyllästettyä puuta työstäessä terät kuluvat nopeammin. Vesilasikyllästykseen lisäksi puu usein myös lämpökäsitellään, koska pelkkä vesilasikyllästys ilman sitä seuraavaa lämpökäsittelyä lisää puun hygroskooppisuutta. Ero käsittelemättömään puuhun verrattuna tulee erityisesti esille korkeassa yli 65 %:n ilman suhteellisessa kosteudessa. Korkeampi tasapainokosteus lisää kosteuselämistä, joten lämpökäsittelyllä saadaan parannettua dimensiostabiilisuutta. Matalampi tasapainokosteus vähentää myös lahon riskiä, sillä tällöin kosteusolosuhteet eivät ole lahottajasienille niin suotuisat. (Väärä & Turunen 2014, 61-65.)



Stora Enso valmistaa vesilasikyllästettyä puuta tuotenimellä Q-Treat. Kyseiselle tuotteelle luvataan erinomainen lahonkesto. Muita kyseisen tuotteen etuja on pihkattomuus, myrkyttömyys, ympäristöystävällisyys, sekä parantunut palonkesto. Q-Treat-käsittelyn ensimmäisessä vaiheessa mäntysahatavara esikäsitellään käsittelyaineen tasaisen leviämisen varmistamiseksi. Seuraavassa vaiheessa käsitellään puuta kvartsihiekasta johdetulla natriumsilikaattiliuoksella, millä saavutetaan paremmat palon- ja säänkesto-ominaisuudet sekä kovuus. Jälkikäsitelyssä varmistetaan puun mittapysyvyys sekä silikaatin pysyminen puussa. (Q-Treat 2013.)

Vesilasikyllästettyä puuta valmistavan TimberSIL mukaan vesilasi kiinnittyy lujaasti puuhun, eikä sen pois huuhtoutumista tapahdu pitkänkään ajan kuluessa. Myös mm. lujuusominaisuuksien, dimensiostabiilisuuden, palonkestävyyden ja kovuuden luvataan paranevan. Näihin tietoihin on kuitenkin suhtauduttava varauksella, sillä ne ovat tuotevalmistajan ilmoittamia, eikä niistä käy ilmi koejärjestelyt. (Väärä & Turunen 2014, 57-59.)

Fine Homebuilding Internetartikkelin mukaan TimberSIL-tuotteet eivät koskaan lyöneet kunnolla markkinoilla läpi ja useat kuluttajat ovatkin valittaneet, kun tuotteet eivät ole kestäneet niille luvattua 40 vuoden takuuta. Eräässä tapauksessa puurakenteet täytyi vaihtaa jo kahden vuoden jälkeen, koska rakenteet olivat heikentyneet. Vahingoittuneiden yritysten omaisuuksien ostamiseen erikoistunut A New York investment firm on ostanut oikeudet TimberSIL brändille. (Gibson 2016.)

Vesilasikyllästetyn puun voi hävittää polttamalla, mutta se palaa huonosti ja puun tuhka sintraantuu ja lasittuu. Pienet määrät voidaan polttaa normaalin puun joukossa, mutta suuremmat määrät tulisi polttaa leijupetikattiloissa. (Boren 2010, 59.)

Q-Treat-tuotteiden luvataan soveltuvan mm. seuraaviin käyttökohteisiin (Q-Treat 2013):

- laiturit
- terassit
- rakennusten ulkoverhous
- piharakenteet

- lasten leikkelineet
- sähkö- ja valaisinpylväät
- meluesteet
- pitkospuut
- ratapölkyt
- palonkestoa vaativat kohteet
- portaat ja lattiat

## 6 KEMIALLINEN MODIFIOINTI

Puun kemiallisessa modifioinnissa puuhun lisätään kemikaaleja, jotka reagoivat puun polymeerien hydroksyyliyhymien kanssa. Kemiallisella modifioinnilla pyritään ensisijaisesti vähentämään puuhun sitoutuvan veden määrää ja näin ollen pienentämään puun kosteuselämistä ja parantamaan biologista kestävyyttä. Joillakin kemikaaleilla voidaan parantaa puun kovuutta, kulutuskestävyyttä ja palonkestävyyttä. Puun kemiallisessa modifioinnissa on kokeiltu mm. seuraavia kemikaaleja: anhydridejä, furfuryylialkoholia, epoksia, isosyanaatteja, karboksyylihappoja, happoklorideja, formaldehydia, fenoli- ja melamiini-formaldehydihartseja. Tutkimuksissa voihappo- ja propionihappokäsittelyllä on saatu asetyloinnin tasoisia tuloksia (Kärkkäinen 2007, 206). Vain puun asetylointi ja furfulointi on kehitetty kaupalliselle asteelle. Sopivan tuotantotekniikan puuttuminen tai kemikaalin korkea hinta ovat estäneet muiden kemikaalien kehittymisen kaupalliselle asteelle. (Väärä & Turunen 2014, 70.)

### 6.1 Asetylointi

Asetyloidulla puulla tarkoitetaan puuta, joka on käsitelty etikkahappoanhydridillä. Etikkahappoanhydridi reagoi puun soluseinämän polymeerien hydroksyyliyhymien kanssa. Reaktiossa hydroksyyliyhymät korvautuvat asetyyliyhymillä ja sivutuotteena vapautuu etikkahappoa. Syntynyt etikkahappo pyritään poistamaan puusta, koska se heikentää puun lujuutta ja aiheuttaa hajuhaittoja. Asetylointi on yksi tutkituimmista puun modifiointimenetelmistä. (Väärä & Turunen 2014, 70.)

Puun asetylointia on tutkittu jo 1920-luvulta lähtien ja ensimmäiset asetylointi kokeet puulle tehtiin vuosina 1928 ja 1930. (Mahlberg 1988, 17). Asetyloitua puuta alettiin ensimmäisen kerran valmistaa kaupallisessa tarkoituksessa 1960-luvulla Yhdysvalloissa sekä myöhemmin myös Neuvostoliitossa. 1990-luvulla myös Japanissa alettiin valmistamaan asetyloitua puuta kaupallisessa tarkoituksessa. Mikään näistä yrityksistä ei kuitenkaan tuottanut kaupallista menestystä. Asetyloitua puuta on nykyisin markkinoilla tuotenimellä Accoya® Titan Woodin valmistamana (Väärä & Turunen 2014, 70). Accoya-puuta valmistetaan vuosittain noin 40 000 kuutiota ja tuotantokapasiteettia ollaan nostamassa vuonna 2018 60 000 kuutiota (Mantanis 2017, 4480). (Hill 2006, 183.)

### **6.1.1 Asetyloidun puun ominaisuudet ja käyttökohteet**

Asetylointi tekee puun solukosta vettä hylkivää ja täten puun dimensiostabiiliisuus paranee. Dimensiostabiiliisuus on asetyloidulla puulla selvästi parempi kuin furfuloidulla puulla. Lahottajasieni ei pysty tunkeutumaan asetyloituun puuhun, sillä alentuneen tasapainokosteuden vuoksi puun kosteus ei ole riittävän korkea lahottajasienille. Biologinen suoja on asetyloidulla puulla parempi kuin furfuloidulla puulla. Asetylointi antaa suojaa myös laivamatoja vastaan, vaikka sitä ei markkinoida laivamadoilta suojaavana. Suoja laivamatoja vastaan ei ole kuitenkaan CCA- ja kreosiittikyllästeiden veroinen. (Mantanis 2017, 4485; Puuinfo, Accoya®-puu s.a.; Väärä & Turunen 2014, 72.)

Asetyloinnin astetta kuvataan WPG-arvolla (Weight per centage gain), joka tarkoittaa puun painon nousua asetylointikäsittelystä johtuen. Käytännössä voidaan päästä enintään noin 25 %:n WPG arvoon, sillä korkeimmilla arvoilla lujuusominaisuudet alkavat kärsiä. Mitä suurempi on asetyylin määrä, sitä alhaisempi on puun tasapainokosteus. Esimerkiksi WPG-arvon ollessa 15 % männyn ja haavan tasapainokosteus on vain noin puolet käsittelemättömään puuhun verrattuna. (Väärä & Turunen 2014, 70-71.)

Asetyloidulle puulle annetaan EN 350-2 standardissa parhaan (1-luokan) arvio biologisesta kestävydestä. 1-luokka vastaa trooppisten puulajien tiikin, ipén ja merbaun biologista kestävyyttä. Asetylointi parantaa merkittävästi suojaa

valko- ja ruskolahottajia vastaan. Suuri asetyylipitoisuus parantaa suojaa termittejä vastaan merkittävästi. Asetylointi ei heikennä lujuusominaisuuksia vaan kovuutta voidaan parantaa jopa 15–30 %. (Mantanis 2017, 4480-4481.)

Lahotuskokeessa asetyloituja puukappaleita altistettiin ruskealaholle. 16–24 viikon testeissä havaittiin vain vähän massahäviötä WPG-arvon ollessa 20 %. WPG-arvon ollessa matalampi oli massahäviö merkittävämpi. Käsittelemättömän männyn vertailukappaleen massahäviö 24 viikossa oli 70 %. (The Third European Conference on Wood Modification 2007, 37-38.)

Suomessa ja Ruotsissa tehdyssä kenttäkokeessa tutkittiin asetyloidun puun biologista kestävyyttä. Tutkimuksessa havaittiin asetyloidun puun (WPG-22 %) olevan 15 vuoden maakosketuksessa yhtä kestävää kuin CCA-kyllästetty puu. Testissä todettiin, että asetyloidut ja pintakäsittellyt paneelit ovat pitkäikäisempiä 13 vuoden testissä kuin pelkästään pintakäsittellyt paneelit. Tutkimuksessa havaittiin melamiinihartsilla pinnoitetun asetyloidun puun antavan hyvän suoja laivamatoja vastaan. Kahdeksassa vuodessa havaittiin vain pieniä muutoksia, kun käsittelemättömät kappaleet hajosivat vuodessa. (The Third European Conference on Wood Modification 2007, 71.)

Vaikuttaa siltä, että useimmat asetyloinnin aiheuttamat muutokset johtuvat so-luseinämän paisumisesta enemmän kuin käsittelyn aiheuttaman hydroksyyli-ryhmien korvaamisen määrästä. Yleisesti ottaen asetylointi ei vaikuta merkittävästi puun lujuusominaisuuksiin olettaen, että käsittely lämpötila ei ole liian suuri. (Hill 2006, 76.)

Pohjoismaista mäntyä voidaan asetyloidua, mutta ongelmana on puun sisään jäävä etikkahappo. Radiata-männyllä, poppelilla ja haavalla puuhun jäävän etikkahapon poistaminen onnistuu, mutta pohjoismaisella männyllä tämä ei onnistu. Käsittelyn jälkeen etikkahappo on muutettava etikka-anhydridiksi, joka vaatii oman prosessinsa. Prosessin aikana talteen otettua etikkahappoanhydridiliuosta voidaan kuitenkin kierrättää laitteistossa ja käyttää puumateriaalin kyllästämiseen useita kertoja, kunnes etikkahapon pitoisuus on liian suuri (Mahlberg 1988, 36). Asetylointi on monimutkainen menetelmä ja investoinneiltaan kallis. (Boren 2010, 45-46.)

Etikkahapon korrosoivan vaikutuksen vuoksi käsittelylaitteisto on valmistettava haponkestävästä materiaalista (Mahlberg 1988, 38). Korroosion vuoksi asetyloidun puun kiinnityksessä on suositeltavaa käyttää ruostumattomasta teräksestä valmistettuja kiinnikkeitä (The Third European Conference on Wood Modification 2007, 408).

Accoya-tuotteille annetaan 50 vuoden takuu maanpäällisissä rakenteissa ja 25 vuoden takuu maakosketuksessa tai vedessä (Puuinfo, Accoya®-puu s.a.). Accoya-puun käyttökohteita ovat muun muassa ikkunarakenteet, ovet, sillat, ulkoverhous ja muut ulkorakentamisen kohteet (Mantanis 2017, 4480). Asetylointi muuttaa myös puun akustisia ominaisuuksia, joten se soveltuu myös musiikki-instrumenttien valmistukseen (Hill 2006, 60). Asetylointi antaa puulle paremman maalaus pohjan (Väärä & Turunen 2014, 16).

## 6.2 Furfulointi

Furfuloinnissa puu kyllästetään furfuryylialkoholilla, joka valmistetaan furfuraalista. Furfuraalia saadaan luonnonmateriaaleista, kuten sokeriruokomelassisista, maissin tähkistä tai lehtipuuhakkeesta laimean rikkihapon avulla. Furfuryylialkoholi on ympäristöystävällinen kemikaali, joka valmistetaan uusituista luonnonvaroista. Myös furfuloinnissa käytetään WPG-arvoa, joka kertoo, kuinka paljon puun massa on suhteellisesti noussut furfulointikäsittelyssä. (Väärä & Turunen 2014, 74-75.)

Furfuloinnin periaate on sama kuin asetyloinnissa, jossa puun hydroksyyliyhymät reagoivat furfuryylialkoholin kanssa. Hydroksyyliyhymät ovat paikkoja, joihin vesi sitoutuu puussa. Vesi ei enää "sovi" puuhun, kun hydroksyyliyhymä on ehtinyt reagoida jonkun muun aineen kuin veden kanssa. Kun puun vapaiden hydroksyyliyhymien määrä on pienentynyt, puussa ei ole enää vapaita paikkoja vedelle. Puu ei tällöin tarjoa edellytyksiä lahottajasienten toimintaan alhaisemman kosteuden vuoksi. Furfuraalin on esitetty reagoivan myös ligniinin kanssa, mutta tätä teoriaa ei ole kuitenkaan todistettu (Hill 2006, 160). (Boren 2010, 55.)

Furfulointia on tutkittu useiden vuosikymmenien ajan 1950-luvulta alkaen. Kuitenkin vasta 2000-luvulla ensimmäiset furfuloidut puutuotteet tulivat Euroopan

ja USA:n markkinoille. Kehitystyössä ovat voimakkaimmin olleet mukana kanadalaiset, norjalaiset ja ruotsalaiset tutkimuslaitokset ja yritykset. Tuloksena ovat syntyneet kaupalliset tuotteet VisorWood® ja Kebony®, joiden valmistus alkoi vuonna 2003 (Väärä & Turunen 2014, 74-75). (Hill 2006, 189.)

Furfuloinnissa tapahtuva polymerisaatio on melko monimutkainen kemiallinen reaktio. Tämän vuoksi tiedeyhteisöissä on erimielisyyksiä siitä, että onko furfulointi todellista kemiallista modifiointia. (Mantanis 2017, 4482.)

### **6.2.1 Furfulointiprosessi**

Furfuloidun puun valmistus koostuu seuraavista vaiheista. Ensin puu painekylästetään furfuryylialkoholin ja katalyyttien vesiliuoksella riittävän tunkeuman aikaansaamiseksi. Seuraavaksi suoritetaan keskivaiheen kuivaus, jonka jälkeen suoritetaan lämpökäsittelyvaihe, jossa furfuryylialkoholi kovetetaan. Lämpökäsittelyvaihe suoritetaan 80–140 °C:n lämpötilassa höyryn toimiessa suo- jakaasuna ja tämä vaihe kestää 6–8 tuntia. Viimeisessä vaiheessa puutavara kuivataan ja tasaannutetaan toimituskosteuteen. (Homan & Jorissen 2004, 370.)

### **6.2.2 VisorWood® ja Kebony®**

VisorWood® on furfuloitua pohjoismaista mäntyä. VisorWood sisältää furfuloitua pintapuuta ja käsittelemätöntä sydänpuuta. VisorWood tuotetta voidaan käyttää vaativissa ulkokohteissa, kuten terasseissa ulkoeristyksissä ja katteissa. VisorWood-tuotteen WPG-arvo on 20–40 % (Hill 2006, 189). (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 11.)

Kebony® on furfuloitua eri mäntylajien pintapuuta tai lehtipuuta, kuten pyökkiä tai saarneaa. Sitä markkinoidaan vaihtoehtona trooppisille kovapuille. Mahdollisia käyttökohteita ovat esimerkiksi seinäpaneelit ja lattian pinnoitteet kohteissa joissa trooppisen puun ulkonäkö, kovuus ja dimesiostabiilisuus ovat tärkeitä ominaisuuksia. Kebony-tuotteesta on olemassa kaksi eri tuotemerkkiä Kebony 30 ja Kebony 100. Kebony 30 tuotteen WPG-arvo on 10–50 % ja Kebony 100 tuotteen WPG-arvo on 70–100 %. (Hill 2006, 189). (The Proceedings of the Third Conference on Wood Modification 2007, 11.)

Nykyisin Kebony AS valmistaa vuosittain Norjassa noin 22 000 kuutiota furfuloitua puuta. Tuotantokapasiteetin oletetaan nousevan uuden Belgiaan rakennettavan tehtaan myötä. (Mantanis 2017, 4485.)

### 6.2.3 Furfuloidun puun ominaisuudet

Furfulointi parantaa lähinnä seuraavia puun ominaisuuksia: dimensiostabiiliisuus, biologinen kestävyys sekä kovuus. Furfuloitu puu on kovempaa ja jäykempää verrattuna asetyloituun puuhun. Furfulointi vaikuttaa myös puun väriin tehden siitä tummemman, mikä antaa sille trooppisen puun ulkonäön (kuva 6). Furfuloinnin vaikutus puun ominaisuuksiin riippuu suuresti WPG-arvosta. Dimensiostabiiliisuus paranee WPG-arvon noustessa. 30 %:n WPG-arvolla kosteuseläminen vähenee noin puoleen käsittelemättömään puuhun verrattuna. 35 %:n WPG-arvolla kosteuseläminen alenee 60 % käsittelemättömään puuhun verrattuna (Väärä & Turunen 2014, 74; Mantanis 2017, 4484-4485.)



Kuva 6. Furfulointi tekee puun väristä tummemman.

Furfuloitu puu on ylennetty biologisen kestävyydeltään EN 350-2 standardin ykkösluokkaan, joten sille annetaan vähintään 30 vuoden käyttöikä. Yhdeksän vuoden tutkimuksessa on todettu, että furfuloidun puun (30-35 % WPG-arvolla) biologinen kestävyys on verrattavissa CCA-kyllästettyyn mäntyyn. Furfuloinnin on todettu toimivan paremmin valkolahottajia kuin ruskolahottajia vastaan (Hill 2006, 160). Furfulointi suojaa myös laivamatoja vastaan, mutta

tällöin WPG-arvon on oltava yli 50 %. Furfuloitua puuta ei kuitenkaan toistaiseksi markkinoida laivamatoja kestäväenä. Furfuloidun puun polttamisesta ei vapaudu enempää orgaanisia yhdisteitä tai polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä käsittelemättömään puuhun verrattuna. Furfuloinnilla saadaan parannettua myös puun maalaus pohjaa (Väärä & Turunen 2014, 16). (Mantanis 2017, 4484-4485.)

Kiinalaisessa tutkimuksessa tutkittiin furfuloinnin tunkeutumaa mikroskooppilla. Furfuraalialkoholi tunkeutui testissä hyvin puun soluonteloihin sekä soluseinämään. Maleiinianhydridin käyttö katalyyttinä nosti WPG-arvoa. Maleiinianhydridi paransi prosessin polymerisaatiota ja täten lämpökäsittelyn lämpötilaa ja aikaa voitiin vähentää. Maleiinianhydridi kuitenkin heikensi soluseinämän vahvuutta korkeissa lämpötiloissa ja pitkissä lämpökäsittelyajoissa. Käytettäessä maleiinianhydridiä katalyyttinä optimaalisen tuloksen saavuttamiseksi tarvitaan alle puolet lyhyempi käsittelyaika kuin sitruunahappoa ja oksaalihappoa sisältävää katalyyttiä käytettäessä. (Li ym. 2016, 3623-3624.)

Furfuloidun puun tuotantokustannukset ovat noin 800-1000 euroa kuutiolle. Tuotantoprosessi on kallis, koska prosessi koostuu kolmesta eri osasta. Lisäksi furfuraalialkoholin hinta on korkea ja kulutus suuri. Kulutus on pienimmällään noin 100 kg/m<sup>3</sup> ja aineen hinta noin 4 euroa kilo. Tuotantoprosessissa käytetään korkeita, jopa yli 150 asteen lämpötiloja. Täten halkeiluriski on jo tuotantovaiheessa suuri. (Boren 2010, 55-56.)

## 7 PUU-MUOVIKOMPOSIITIT

Laajasti ottaen puu-muovikomposiiteilla tarkoitetaan materiaaleja, joissa missä tahansa muodossa oleva puu ja muovi on yhdistetty. Tämän määritelmän mukaan esimerkiksi vaneri ja lastulevy voidaan luokitella puu-muovikomposiitiksi. Nykyisin puu-muovikomposiitti termin käyttö on vakiintunut tuotteille, joissa puu on jauhomaisessa muodossa ja muovina käytetään kestopuuvia. Englannin kielessä käytetään lyhennettä WPC, joka tulee sanoista wood-plastic composites. Pääkomponenttien (puun ja muovin) lisäksi tuotteeseen lisätään usein lisäaineita prosessin helpottamiseksi ja tuoteominaisuuksien parantamiseksi. Käytettäviä lisäaineita ovat mm. kytkentäaineet, stabilointiaineet, pigmentit,



liukuaineet ja lahonsuoja-aineet. KytKentäaineilla varmistetaan puun ja muovin yhteenliittyminen (Keskisaari 2017, 14). (Väärä & Turunen 2014, 84.)

Puu-muovikomposiitteja on valmistettu Yhdysvalloissa jo usean vuosikymmenen ajan, mutta niitä on valmistettu Euroopassa jo aiemminkin. Puu-muovikomposiittien merkittävä nousu tapahtui kuitenkin vasta vuonna 1983 Yhdysvalloissa. American Woodstock aloitti tuolloin valmistamaan puu-muovikomposiitteja autoteollisuudelle. Tuolloin käytössä oli polypropeenin ja puun seos, joka sisälsi noin 50 % puuta. 1990-luvulla puu-muovikomposiitteja alettiin myymään myös mm. terassilautoina ja ovi- ja ikkunakomponentteina. 1990-luvun puolivälistä lähtien puu-muovikomposiittien tuotanto on kasvanut suuresti. Vuonna 2001 puu-muovikomposiitteja myytiin 320 000 tonnia. (Rowell 2005, 366.)

Puu-muovikomposiittien yleisin valmistustapa on sulatetun puumuovimassan suulakepuristus haluttuun profiiliin suuttimen läpi. Menetelmä soveltuu hyvin pitkien profiloitujen tuotteiden valmistukseen. Tällä menetelmällä tuotteeseen on mahdollista saada onteloita, jolloin voidaan vähentää materiaalin kulutusta ja alentaa tuotteen tiheyttä. Suulakepuristuksessa puuaineen osuus voi olla jopa 80–90 %. Toinen yleisesti käytetty menetelmä on ruiskuvalu, jossa sula materiaali ruiskutetaan muottiin ja tuotteen jäähtyttyä muotti avataan. Menetelmällä saadaan tehtyä muodoltaan monimutkaisia tuotteita, mutta puuaineen osuus on tällöin enintään 40 %. (Väärä & Turunen 2014, 85.)

## **7.1 Puu-muovikomposiittien ominaisuudet ja käyttökohteet**

Puu-muovikomposiiteissa on mahdollista yhdistää puun ja muovin luontaisia hyviä raaka-aineominaisuuksia halutulla tavalla. Puu-muovikomposiitti on materiaaliseos, joka sisältää puuta ja kesto- tai kertamuoveja. Komposiitti -termi sisältää varsin laajalla sektorilla eri komposiittimateriaaleja. Puuaineksena voi käyttää puujauhoa tai puumaista ainesta kuten pellavaa. Kestomuovihartsit, kuten polypropeeni, polyeteeni, polystyreeni ja polyvinyylikloridi (PVC), pehmenevät lämmön vaikutuksesta ja kovenevat jäähdytettäessä. Tämä ominaisuus mahdollistaa muiden materiaalien sekoittamisen niihin. PVC-muovin käyttö on ongelmallista sen sisältämän kloorin vuoksi (Väärä & Turunen 2014, 84). (Puu-muovikomposiitit s.a., 1-2.)

Puu-muovikomposiiteissa puuaineksen osuus on tavallisesti noin 30–60 %. Puuaineeksena käytetään useimmiten sahanpurua tai puuteollisuuden jatkojalostuksen sivutuotteista valmistettua puujauhoa. Materiaalina voidaan käyttää myös jätettä, metsähaketta tai pellettejä. Käytettävät muovit voivat olla kierrätysmuoveja ja vain vaativissa sovelluskohteissa on tarpeen käyttää uusia muovimateriaaleja. Näin ollen komposiitit ovat erittäin ympäristöystävällisiä tuotteita, sillä ne voidaan hyvin pitkälti valmistaa kierrätyskelpoisista materiaaleista. (Puu-muovikomposiitit s.a., 2.)

Koska puu-muovikomposiitit imevät vähemmän vettä kuin puu, niillä on parempi suoja lahoa vastaan ja niiden dimensiostabiilisuus kosteusvaihtelussa on parempi. Mitä enemmän puu-muovikomposiiteissa on puuta, sitä enemmän ne imevät kosteutta ja sitä enemmän ne laajenevat kosteuden vaikutuksesta. Toisaalta kun puu-muovikomposiittien puun määrää vähennetään, lämpölaajeneminen kasvaa. Lämpölaajeneminen voi olla pituuden suuntaan jopa yli 10 kertaa suurempaa massiivipuuhun verrattuna (Väärä & Turunen 2014, 88). Komposiitteihin jotka sisältävät paljon puuta voidaan lisätä esimerkiksi sinkki-boraattia lahonsuojaominaisuuksien parantamiseksi. Puu-muovikomposiitit poikkeavat monista muista materiaaleista siinä, että ne voivat sulaa sekä palaa tulen vaikutuksesta. (Rowell 2005, 374.)

Puu-muovikomposiittien ominaisuudet ja suorituskyky vaihtelevat paljon. Ominaisuudet vaihtelevat mm. materiaalin ja valmistusmenetelmän mukaan. Puu-muovikomposiittien lujuus ja erityisesti kimmokerroin ovat heikompia massiivipuuhun verrattuna. Puukuidun määrän lisäys pääsääntöisesti kuitenkin parantaa taivutuslujuutta, vetolujuutta ja kimmokerrointa. Puukuidun määrän lisäys alentaa kuitenkin iskulujuutta. (Väärä & Turunen 2014, 85-86.)

Puu-muovikomposiittien hyvät ominaisuudet tulevat parhaiten esiin ulkokäytössä. Ne soveltuvat käyttökohteisiin joissa vaaditaan hyvää sään ja lahonsuojaa, sekä kulutuksenkestävyyttä ja helppoa huollettavuutta. Ne eivät välttämättä sovellu kohteisiin joissa vaaditaan erinomaisia lujuusominaisuuksia. Käyttökohteita ovat esimerkiksi: (Väärä & Turunen 2014, 88.)

- terassilaudoitukset
- seinien ulkoverhoukset
- aidat

- kaiteet
- ulkokalusteet
- katteet
- ikkuna- ja oviprofiilit
- autoteollisuus
- lattiat
- huonekalut

## **7.2 Puu-muovikomposiittien taloudelliset näkymät**

Puu-muovikomposiitit sekä muut luonnonkuitukomposiitit ovat kasvattaneet suosiotaan voimakkaasti 2000-luvulla. Voimakkainta kasvu on ollut Pohjois-Amerikassa, jossa ala on kehittynyt nopeasti. Viime vuosina luonnonkomposiittirakenteet ovat kasvattaneet suosiota voimakkaasti myös Euroopassa, jossa suurimpana käyttökohteena on autoteollisuuden sisäpaneelit. Suomessa puu-muovikomposiittien tarjonta on vielä vähäistä. (Puu-muovikomposiitit s.a., 1.)

Puu-muovikomposiittien suurin käyttökohde on viime vuosina ollut terassirakentaminen ja autoteollisuus, mutta uusia tuotesovelluksia tulee jatkuvasti voimakkaasti kasvaville markkinoille. Erilaisilla raaka-aineilla on mahdollista saada erilaisia ominaisuuksia komposiitteihin. Käyttämällä kierrätysmateriaaleja voidaan pienentää merkittävästi valmistuskustannuksia. Laskevat materiaalikustannukset tekevät komposiittien valmistuksesta kannattavampaa ja näin saattaa houkutella alalle uusia toimijoita. Erilaisten kierrätysmateriaalien hyötykäytössä on kuitenkin myös haasteita. Monet materiaalit vaativat erilaisia esikäsittelyjä ennen hyödyntämistä ja siten teettävät enemmän työtä verrattuna neitseellisiin raaka-aineisiin käytettäessä. Kierrätyksestä tulevan materiaalin laatua ja tasaista materiaalivirtaa voi olla hankala säädellä. (Keskisaari 2017, 15.)

Vuonna 2015 Puu-muovikomposiittien markkinan kooksi arvioitiin 4,06 miljardia Yhdysvaltain dollaria. Puu-muovikomposiittien kysyntä on kasvanut vuosittain ja sen uskotaan kasvavan yhä edelleen. (Grand View Research 2016.)

## 8 MODIFIOIDUN PUUN KÄYTTÖKOHTEET

Modifioidulle puulle löytyy useita eri käyttökohteita. Tässä osassa käydään läpi muutamia yleisimpiä käyttökohteita, joissa voidaan käyttää modifioitua puuta ja selvitetään mitkä modifiointimenetelmät soveltuvat kyseisiin käyttökohteisiin. Eri modifiointimenetelmät vaikuttavat hyvin eri tavalla puun ominaisuuksiin, joten kaikkiin käyttökohteisiin ei sovellu sama modifioitu puutuote. Puutavaran valintaan vaikuttaa suuresti tuotteen hinta. Hinnassa tosin tulisi ottaa huomioon koko tuotteen elinkaaren vaikutus. Kustannuksia miettiessä on huomioitavaa myös se, että modifioimaton puu tulee yleensä maalata tai käsitellä jollakin suoja-aineella ja tämä lisää kustannuksia. Modifioitua puuta voidaan usein käyttää sellaisenaan ilman lisäkäsittelyjä, mutta niidenkin käyttöikä ja ominaisuuksia voidaan usein parantaa entisestään erilaisilla suoja-aineilla.

Vaikka modifiointi nostaa puun hintaa, sen valintaa voi puoltaa se, että tuotteen valmistuksessa puun raaka-ainekustannus on pieni, mutta ominaisuudet joita modifiointi parantaa ovat lopputuotteen kannalta merkittävät. Esimerkiksi ikkuna on monista materiaaleista koostuva tuote, jossa puun osuus valmistuskustannuksista ei ole kovin merkittävä. (Väärä & Turunen 2014, 13.)

### 8.1 Pylväät ja ratapölkyt

Boren (2010, 63) lajittelee kyllästysaineet ja –menetelmät puupylväissä käyttöönsä mukaiseen paremmuusjärjestykseen seuraavasti:

1. Kreosoottikyllästys 110 kg/m<sup>3</sup> (NTR A-luokka), käyttöikä 60 vuotta
2. CC-kyllästys NTR A-luokka, käyttöikä 50 vuotta
3. Kreosootti 75 kg/m<sup>3</sup>, käyttöikä 50 vuotta
4. Vesilasi 75 kg/m<sup>3</sup> + mäntyöljy 50...100 kg/m<sup>3</sup>, käyttöikä 50 vuotta
5. Mäntyöljy 150...200 kg/m<sup>3</sup>, käyttöikä 50 vuotta
6. Kupari ja/tai boori 2...3 kg + mäntyöljy 100 kg/m<sup>3</sup>, käyttöikä 50 vuotta
7. C-kyllästys NTR A-luokka + tyviosan kreosoottikyllästys 50 kg/m<sup>3</sup>, käyttöikä 50 vuotta.
8. C-kyllästeet valmistajien suosittelemilla pitoisuuksilla, käyttöikä 40 vuotta

Yhdistelmistä potentiaalisimmat ratkaisut ovat yhdistää kupari tai vesilasi mäntyöljyyn. Kupari toimii hyvin katkolahoa vastaan ja mäntyöljy ruskolahoa vastaan. Lisäksi mäntyöljy sitoo kuparin puuhun. Vesilasi voidaan polymeroida puuhun vähäisellä öljymäärällä. Käyttöiän maksimointi yhdistelemällä eri kylästeitä on lähes aina kannattamatonta, koska investointikustannusten nousu kumoaa käyttöiän pidentymisestä saatavan kustannushyödyn. (Boren 2010, 67-86.)

Kaikkien öljykylästeiden ongelmana on se, että pylvästyksessä työntekijöiltä vaaditaan asianmukaista suojausta, mikä lisää kustannuksia. Kreosoottikyllästetty puupylväs on selvästi C-kyllästettyä edullisempi vuosikustannuksiltaan etenkin silloin, kun käytetään lujuuslajiteltua, harjalatvaista ja tyviosastaan puolipuhdasta pylvästä. Edullisimmat vaihtoehdot ovat kreosootti-pylväs alennetulla pitoisuudella  $75 \text{ kg/m}^3$  sekä CC-kyllästetty pylväs, jota käytetään Euroopassa CCA-pylvään korvaajana. Suomessa CC-kyllästettyä ei ole ainakaan vielä hyväksytty. Tällä hetkellä NTR-A luokan kreosoottipitoisuus vaatimus on kreosoottiöljystä riippuen  $100\text{--}110 \text{ kg/m}^3$ . Kustannuksia voidaan pienentää pienentämällä kreosootin pitoisuutta, sillä kreosootin teho lahoa vastaan ei juuri enää kasva, kun sen pitoisuus puussa ylittää  $75 \text{ kg/m}^3$ . Myös Mäntyöljy  $150 \text{ kg/m}^3$  pitoisuudella on potentiaalinen vaihtoehto. Öljykylästeillä voidaan lisäksi jättää tyviosa puolipuhdaaksi, joka lisää lahoamisvaraa. Vuosikustannuksiltaan edullisin ratkaisu on käyttää lujuuslajiteltua, tyviosastaan puolipuhdasta kreosoottikyllästettyä pylvästä. (Boren 2010, 30-86.)

Furfulointi ei ole hyvä vaihtoehto pylväiden käsittelyyn, koska furfulointi on kallis puun modifiointimenetelmä. Tuotantoprosessi on monivaiheinen ja siinä käytetään korkeita, jopa yli 150 asteen lämpötiloja, jotka heikentävät merkittävästi puun lujuusominaisuuksia. Tämän vuoksi halkeiluriski on suuri, joka on haitallista pylväiden tuotannon kannalta. (Boren 2010, 56.)

Myöskään asetylointi ei ole hyvä vaihtoehto pylväiden käsittelyyn, sillä menetelmä on monimutkainen ja investoinneiltaan kallis. Asetylointi on siinäkin mielessä huono vaihtoehto Suomessa, kun se ei sovellu pohjoismaiselle mäntylle, koska puuhun jäävää etikkahappoa ei saada kunnolla poistettua. Asetylointi sopii kuitenkin sähköpylväiden käsittelymenetelmäksi, jos raaka-aineena käytetään radiatamäntyä, poppelia tai haapaa. (Boren 2010, 45-46.)

Ratapölkkyissä käytetään enimmäkseen kreosootilla kyllästettyä puuta. Ratapölkkyt joutuvat merkittävään lahoamisriskiin maakosketuksen vuoksi, joten kreosootin käyttö on perusteltavissa. Ratapölkkyjä on myös vaikea vaihtaa, joten pitkä käyttöikä on tarpeen. Ratapölkkyinä voidaan käyttää myös vesilasikyllästettyä puuta. (Väärä & Turunen 2014, 21.)

## 8.2 Rakennusten ulkoverhous

Rakennuksen ulkoverhouksissa käytetään usein puuta. Ulkoverhoukseen kohdistuva suurin rasitus tulee sään vaihteluista ja etelän puolella säärasitus on suurin. Rasitusta aiheuttaa kosteus, sade, lämpö, pakkanen ja auringon valo. Auringon lämpö voi tuoda pihkaa verhouksen pintaan ja puu pyrkii halkeilemaan pinnalta lämpövaihtelun ja kosteuselämisen vuoksi. Mikäli ulkoverhouksen rakennesuunnittelu on kohdallaan, ei puu ole käytännössä alttiina laholle. Näin ollen normaali modifioimaton puutavara soveltuu ulkoverhousmateriaaliksi. Modifioimaton puu vaatii kuitenkin oikean asennuksen, pintakäsittelyn ja huollon. (Väärä & Turunen 2014, 14.)

Ulkoverhouksessa voidaan käyttää lämpökäsiteltyä puuta. Sen etuina on pihkattomuus ja pienempi kosteuseläminen. Pienemmän kosteuselämisen seurauksena halkeilukin vähenee. Vesilasikyllästetyn puutavaran käyttö voi olla perusteltua, jos verhoukselle halutaan parempaa palonkestoa. Lisäksi vesilasikyllästykseen liittyvä lämpökäsittely vähentää pihkavuotoja. Asetyloitu ja furfuroitu puutavara parantavat puumateriaalin dimensiostabiiliisuutta ja täten pienentävät pinnan halkeilua. Ne antavat puulle myös paremman maalaus pohjan. Näiden kaikkien tuotteiden hinta on tosin korkeampi kuin käsittelemättömän puutavaran. (Väärä & Turunen 2014, 16.)

Markkinoilla on myös ulkoverhoukseen tarkoitettuja puu-muovikomposiitteja. Ne ovat normaalia puuta huomattavasti kalliimpi vaihtoehto, mutta niiden etuja ovat säänkestävyys ja vähäisempi huoltotarve. Paineekyllästetyn puun käyttö ulkoverhouksessa on perusteltua vain, jos ulkoverhous on hyvin lähellä maanpintaa, jolloin lahoamisriski on olemassa. Mäntyöljyllä käsitelty puutavara ei sovellu ulkoverhoukseen, koska öljyn pintaan tihkuminen on todennäköistä. (Väärä & Turunen 2014, 16.)

### 8.3 Sillat ja laiturit

Siltojen ja laitureiden runkorakenteeksi soveltuu A-luokan kestopuu. Suolaiseen meriveteen kosketuksessa olevat osat tulee valmistaa M-luokan kestopuusta. Siltojen ja laiturien kansirakenteissa voidaan käyttää AB-luokan kestopuuta, lämpökäsiteltyä puuta tai vesilasikyllästettyä puuta. (Väärä & Turunen 2014, 21.)

Asetylointi ja furfulointi toimivat hyvin myös silta- ja laiturirakenteissa, sillä ne antavat hyvän suojan lahoa vastaan. Ne antavat suojan myös laivamatoja vastaan. Asetyloinnin ja furfuloinnin etuna on myös niiden ympäristöystävällisyys. Asetyloitu puu antaa paremman biologisen suojan furfulointiin verrattuna. (Mantanis 2017, 4480-4485.)

### 8.4 Terassit

Puun käyttö terassimateriaalina on hyvin yleistä. Terassin altistuminen sään vaikutuksille riippuu paljon siitä, että onko terassia katettu. Lisäksi erityisesti maakosketuksessa olevat rakenteet ovat alttiita laholle. Terassin pintalaudat ovat alttiina taivutusjännitykselle ja mekaaniselle kulutukselle. Normaali modifioimaton puu ei ole kovin pitkäikäinen terassimateriaali erityisesti, mikäli terassia ei ole katettu. Modifioimattoman puun käyttöikää voidaan pidentää suoja-aineilla ja oikean puulajin valinnalla. (Väärä & Turunen 2014, 17.)

Terassimateriaalin käyttöikä saadaan moninkertaistettua, kun käytetään painekyllästettyä kestopuuta. Käyttöikää saadaan pidennettyä 3-5 kertaa pidemmäksi kuin modifioimattomalla puulla (RT 21-10880: 2006, 3). Maakosketuksessa olevan puun tulee olla A-luokan kyllästetty kestopuuta ja terassin kansilaudoitukseen soveltuu AB-luokan kyllästetty kestopuu. Lämpökäsiteltyä puuta voidaan myös käyttää terassilaudoituksena. Lämpökäsittely parantaa puun lahonkestävyyttä ja dimensiostabiilisuutta, mutta sitä ei voi käyttää maakosketuksessa. (Väärä & Turunen 2014, 18.)

Terassilaudoituksena voidaan käyttää myös vesilasikyllästettyä, asetyloitua tai furfuloitua puutavaraa. Paremman lahonkestävyyden lisäksi näillä tuotteilla saadaan parannettua myös pinnan kovuutta ja kulutuskestävyyttä. Kyseiset

materiaalit ovat kuitenkin painekyllästettyä puuta ja lämpökäsiteltyä puuta kalliimpia. Myös mäntyöljyllä kyllästetty puutavara soveltuu terassilaudoitukseksi, mutta huonona puolena voi olla haju ja tahraavuus, joka aiheutuu öljyn tihkumisesta puun pintaan (Boren 2010, 46). (Väärä & Turunen 2014, 18.)

Puu-muovikomposiitit ovat myös yksi vaihtoehto terassimateriaaliksi. Puu-muovikomposiittien hyviä ominaisuuksia ovat vähäinen kosteuseläminen ja huoltotarve sekä parempi biologinen kestävyys. Komposiittien huonoja ominaisuuksia on suuri lämpölaajeneminen ja normaalipuuta heikommat lujuusominaisuudet. Tämä edellyttää pienempää koolausväliä terassilaudoituksen alla. (Väärä & Turunen 2014, 19.)

## 8.5 Saunasisustus

Puu soveltuu hyvin käytettäväksi saunan sisustuksessa ja kylpyhuonekalusteissa. Saunan paneloinnissa ja laudepuuna käytetään yleisesti modifioimatonta kuusta, haapaa, abatsia tai tervaleppää. Laudepuuksi soveltuu hyvin myös lämpökäsitelty haapa, mänty tai kuusi. Lämpökäsittely tekee puusta pihkattoman ja alentuneen lämmönjohtavuutensa ansiosta laude ei tunnu liian kuumalta. Lämpökäsittely lisää myös pinnan vedenhylkivyyttä, mikä tekee pinnasta helpommin puhdistettavan. Lämpökäsittely lisää hygieenisyyttä, sillä lämpökäsittelystä johtuen puun pinnalla on vähemmän ravinteita bakteerikasvua varten. Lämpökäsittelyn puun edut saunarakenteissa korostuu erityisesti yleisissä saunoissa, joita lämmitetään jopa päivittäin (Möller & Otranen 1999, 103-104; Väärä & Turunen 2014, 22.)

Nopeat kastumis- ja kuivumisjaksot kuumassa ympäristössä saattavat aiheuttaa lämpökäsiteltyä puuta käyttäessä lauteiden halkeilun lautojen päistä. Tämän välttämiseksi on suositeltavaa sulkea lautojen päät öljyllä, vahalla tai lakalla. Lämpökäsitelty puu imee syiden suunnassa enemmän vettä kuin käsittelemätön puu. Tällöin on vaarana puun vettyminen ja tästä seuraava homehtuminen. Tästäkin syystä on lautojen päät hyvä sulkea esimerkiksi vedenkestävällä uretaanialkydilakalla. (Möller & Otranen 1999, 104; ThermoWood® -käsikirja 2003-2004, 4-6.)



## 8.6 Lattiapinnoitteet

Puuta käytetään lattiapinnoitteissa joko pontattuina massiivipuulautoina tai parkettina. Lattiapinnoitteen tärkeitä ominaisuuksia ovat kaunis ulkonäkö, hyvä pinnan kovuus ja kulutuskestävyys sekä hyvä dimensiostabiilisuus kosteusvaihteluissa. Myös hyvää taivutuslujuutta ja -jäykkyyttä vaaditaan, mikäli materiaali asennetaan koolauksen päälle. Eduksi lasketaan myös se, että lattia tuntuu lämpimältä ja mukavalta käveltäessä. Edellä mainittuihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa puulajin valinnalla. Mäntyä käytetään usein lattia-lautana, mutta sen huonoja puolia ovat pehmeys ja suurehko kosteuseläminen. Parketeissa käytetään pinnassa kovempia puulajeja, kuten tammea tai pyökkiä. (Väärä & Turunen 2014, 23.)

Lattiapinnoitteille tärkeitä ominaisuuksia voidaan parantaa esimerkiksi vesilasi- sikkylästyksellä, asetyloinnilla tai furfuloinnilla. Näillä menetelmillä saadaan parannettua kovuutta, kulutuskestävyyttä ja dimensiostabiilisuutta. Nämä modifiointimenetelmät antavat luontaisesti pehmeille puulajeille mahdollisuuden korvata yhä vaikeammin saatavia trooppisia kovapuita. Furfuloitu puu myös muistuttaa ulkonäöltään trooppisia puulajeja (Mantanis 2017, 4485). (Väärä & Turunen 2014, 23.)

Myös lämpökäsiteltyä puuta voidaan käyttää lattiamateriaalina. Lämpökäsitelty puu soveltuu paremman dimensiostabiilisuuden ansiosta hyvin lattiamateriaaliksi. Myös tummunut väri katsotaan eduksi, sillä se antaa trooppisen puun ulkonäön. Käyttämällä eri lämpökäsittelyasteita saadaan puusta erilaisia värisävyjä. Lämpökäsitelty puu imee myös vähemmän vettä. Pieni lisäarvo on myös lämmönjohtavuuden heikkeneminen, jolloin lämmöneristyskyky paranee. (Möller & Otranen 1999, 102.)

## 8.7 Ikkunat ja ovet

Ikkunoiden ja ulko-ovien perinteinen materiaali on ollut normaali mäntypuu. Ikkunoiden ja ulko-ovien ulkopuoliset osat joutuvat alttiiksi sään vaikutuksille. Tämä voi johtaa rakenteiden mahdolliseen lahoamiseen, kosteuselämisen aiheuttamiin mittojen muutoksiin, pinnan halkeiluun sekä tarpeeseen aika-ajoin tehtävälle huoltomaalaukselle. Ikkunoissa käytetäänkin nykyisin juuri tästä

syystä varsin paljon alumiinia tai muovia ulkopuitteissa. (Väärä & Turunen 2014, 22.)

Normaalin modifioimattoman puun ominaisuudet eivät aina ole riittävän hyvät ikkunoiden tai ulko-ovien valmistukseen. Ikkunan lahonkestoa saadaan parannettua esimerkiksi käyttämällä ikkunan ulkorakenteissa AB-luokan kestopuuta. Dimensiostabiilisuutta saadaan parannettua käyttämällä ikkunoissa ja ovissa asetyloitua tai furfuloitua puuta ja palonkestoa käyttämällä vesilasikyllästettyä puuta. Puumuovikomposiitteja voidaan myös käyttää ikkunoiden valmistuksessa niiden suhteellisen hyvän säänkestävyyden ja helpon huollettavuuden takia. (Väärä & Turunen 2014, 22.)

## 8.8 Puurakentaminen

Puu on merkittävässä roolissa omakotitalo ja vapaa-ajan rakennuksissa Suomessa. Lähes 99 % kaikista vapaa-ajan rakennuksista on puurakenteisia. Uusista pientaloista yli 80 % saa puurungon ja noin 75 % puujulkisivun. Pientaloilla tarkoitetaan omakotitaloja ja paritaloja. Suomi on kuitenkin Espanjan jälkeen Euroopan kerrostalovaltaisimaa. Vuosittaisista uudisasunnoista puolet (noin 15 000 asuntoa) rakennetaan edelleen kerrostaloihin. Betoni on hallinnut kerrostalojen markkinoita viimeiset viitisenkymmentä vuotta. Suomalaista puurakentamista on kehitetty voimakkaasti 1990-luvun alusta lähtien. Nykyisin Suomen lainsäädäntö sallii jopa 8-kerroksisten puukerrostalojen rakentamisen ja lainsäädäntö sallii myös lisäkerrosten rakentamisen puusta betonisiin kerrostaloihin. Yli 2-kerroksisiin puurakennuksiin tulee asentaa automaattinen sammutuslaitteisto. Puukerrostaloilla uskotaan olevan suuri potentiaali tulevaisuudessa. Puukerrostalot voidaan pystyttää nopeasti, kun käytetään elementtiratkaisuja. (Karjalainen s.a.)

Modifioitua puutakin voidaan käyttää kerros- ja pientalorakentamisessa. Modifioitua puuta voidaan käyttää ulkorakentamisessa, kuten terasseissa ja piharakenteissa. Jos lattialta vaaditaan hyvää kovuutta, kulutuskestävyyttä ja dimensiostabiilisuutta voidaan käyttää esimerkiksi vesilasikyllästettyä, asetyloitua tai furfuloitua puuta. Lisäksi puukerrostaloille asetettujen tiukkojen paloturvallisuusmääräysten vuoksi voi olla tarvetta puun paremmalle palonsuojaukselle.

Palonsuojausta saadaan paremmaksi vesilasikyllästyksellä tai booripohjaisilla kyllästysaineilla.

## 9 MODIFIOINTIMENETELMIEN TULEVAISUUS

Puun modifiointin ympäristökuormituksen vähentämiseen kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Väärä ja Turunen (2014, 91) kuvaavat puun modifiointin haasteet seuraavasti:

Uusien modifiointimenetelmien ja käsittelyaineiden kehittäminen vaatii pitkäjänteistä työtä sekä laaja-alaista osaamista muun muassa erilaisten teknologioiden, kemian ja biologian aloilta. Puumateriaalin epähomogeenisuus, puulajien valtava määrä, huomattavasti toisistaan poikkeavat loppukäyttökohteet ja erilaiset alueelliset lainsäädännöt tuovat kaikki omat haasteensa kehittämistointintaan.

Puun modifiointi nostaa aina puumateriaalin hintaa, joten modifioidun puun käyttäjän tulisi harkita modifiointin mukanaan tuomaa hyötyä suhteessa kustannuksiin. Kustannukset eivät koostu vain materiaalin hankintakustannuksista. Kokonaiskustannuksiin vaikuttaa tuotteen koko elinkaaren aikana tulevat kustannukset. Koko elinkaaren vaikuttavia kustannuksia ovat mm. tuotteen käyttöön liittyvät kustannukset ja käytöstä poistetun materiaalin hävittämiskustannukset. Tuotteen terveellisyys ja ekologisuus voivat myös vaikuttaa ostopäätökseen eri tuotteita vertailtaessa. (Väärä & Turunen 2014, 13.)

Puun modifiointi avaa paljon uusia mahdollisuuksia puulle. Puuta aletaan nykyään käyttämään kohteissa, joissa arkkitehdit ja suunnittelijat ennen harkitsivat vain terästä ja betonia. Puusta rakennetaan esimerkiksi siltoja, joiden täytyy kantaa suuriakin kuormia. Nykyisillä modifiointimenetelmillä ja kehittyneillä rakenneratkaisulla voidaan korvata puulla esimerkiksi sillat, joihin ennen käytettiin vain terästä ja betonia. (The Third European Conference on Wood Modification 2007, 403.)

Kaupalliseen näkymään vaikuttaa suuresti modifiointi menetelmän valmistuskustannukset. Valmistuskustannukset määräytyvät mm. seuraavista asioista. (Hill 2006, 198.)

- raaka-aineesta

- prosessilaitteiden hankinnasta ja huollosta
- energiasta
- kuljetuksesta
- ympäristösäännöistä

Kiinnostus puun modifiointiin on noussut merkittävästi 90-luvun lopulta lähtien. Talouden ja ympäristötietouden tilanne on muuttunut merkittävästi kahdenkymmenen vuoden takaisesta tilanteesta. Puun modifiointiteollisuus ei ole kuitenkaan vakiintunut nykyaikana ja syyt siihen voidaan luokitella seuraavasti. (Hill 2006, 198.)

- Modifioitupuu ei ole lyönyt hyvin läpi markkinoilla.
- Modifioidulla puulla on vähäinen julkinen näkyvyys.
- Modifioinnin investointi- ja tuotantokustannukset ovat korkeita.

Parhaiten vakiintunut puun modifiointiprosessi on suomalainen ThermoWood-prosessi. Yksi tämän teknologian pääasiallisista eduista on suhteellisen pienet laitteiden pääomakustannukset. ThermoWood on lämpöpuun suurin tuottaja maailmassa ja myös kaikista suurin kaikista kaupallisista puun modifiointi liiketoiminnoista. Tuotannon määrä on kasvanut suuresti vuodesta 2001 lähtien. (Hill 2006, 198; Sandberg & Kutnar 2015, 5.)

Furfuloidun puun valmistuslaitteiston pääomakustannukset ovat melko alhaiset verrattuna muihin kemiallisiin modifiointeihin. Furfuloinnin kaupallistaminen on myös hyvin kehitettyä. Muut prosessit sisältävät suuremmat pääomakustannukset ja niiden kehittäminen on siten nähty olevan epävarmempaa. Tällaisia prosesseja ovat mm. asetylointi ja Plato-prosessi. Kuitenkin kun nämä prosessit ovat olleet toiminnassa muutaman vuoden ajan ja pääomakustannukset ovat saatu maksettua pois, tulee tuotteiden hinnat laskemaan, joka johtaa kysynnän kasvuun. (Hill 2006, 198.)

## 10 YHTEENVETO

Puun modifioinnissa on haasteena saada kuluttajat vakuuttuneeksi tuotteen hyödyistä. Modifiointi nostaa aina lopputuotteen hintaa ja hinta on se mikä

usein vaikuttaa eniten kuluttajien ostopäätökseen. Onkin tärkeää saada kuluttajat ajattelemaan koko tuotteen elinkaaren aiheuttamia kustannuksia. Monilla menetelmillä saadaan tuotteen käyttöikää ulkokäytössä pidennettyä huomattavasti ja tällöin modifioitu puutuote onkin pitkällä aikavälillä usein edullisempi vaihtoehto. Tärkeässä roolissa puun modifioinnin tulevaisuuden kannalta onkin laaja ja puolueeton tutkimustyö. Modifioidun puutuotteen tutkimustyö vaatii hyvin pitkäaikaista tutkimustyötä ja osaamista monilta eri aloilta. Erityisesti lahonsuojauksen tutkimuksessa vaaditaan hyvinkin pitkä tutkimusaika, sillä lahon iskeytymiseen puuhun voi kulua useita vuosiakin. Lahonsuojauksen tutkimista voidaan kuitenkin nopeuttaa laboratorio-olosuhteissa, mutta laboratoriotesteistä ei voida varmuudella sanoa, että käyttäytyykö puu oletetulla tavalla pitkäaikaisissa lahotuskokeissa ulkokäytössä. Lisäksi parantamalla tuotteiden markkinointia voidaan tuotteiden kysyntää saada kasvatettua.

Kiinnostus puun modifiointiin on kasvanut selkeästi viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Pääasiallisena syynä tähän on ollut varmasti CCA-kyllästeiden käyttökielto. Muutenkin tuotteiden terveellisyys ja ympäristöystävällisyys ovat nousseet jatkuvasti merkittävämpään rooliin. Kiinnostus puun modifiointiin tulee varmasti jatkumaan.

Puun kemiallisen modifioinnin alueelta voidaan tulevaisuudessa löytää uusia toimivia ja kustannustehokkaita menetelmiä. Kemiallisesta modifioinnista on paljon tutkimustietoakin ja niiden on todettu parantavan monia puun ominaisuuksia. Ongelmana onkin saada menetelmistä taloudellisesti kannattavia. Kemikaalin korkea hinta, korkeat tuotantokustannukset tai sopivan tuotantomenetelmän puuttuminen voivat estää prosessien käyttöönoton kaupallisella tasolla. Mielenkiintoista on myös se, että joillakin kemikaaleilla saadaan tutkitusti parannettua puun ominaisuuksia, mutta niiden vaikutusmekanismit eivät välttämättä ole täysin selvät. Esimerkkinä tästä on epäselvyys siinä, että onko furfurointi kemiallista modifiointia. Kun vaikutusmekanismit saadaan täysin selville, voidaan löytää keinoja, joilla käsittely saadaan tuotettua tehokkaammin ja näin pienennettyä kustannuksia. Kustannuksia voidaan saada pienennettyä pienentämällä modifiointiin käytettävän kemikaalin määrää. Tähän voidaan päästä esimerkiksi käyttämällä erilaisia katalyyttejä ja lisäaineita, sekä kehittämällä tehokkaampia valmistusprosesseja. Myös kun tuotanto lisääntyy ja saatavuus paranee, kustannuksia saadaan mahdollisesti laskettua.

Kebony AS valmistaa furfurointua puuta vuosittain noin 22 000 kuutiota ja asetyloitua puuta valmistetaan noin 40 000 kuutiota vuosittain. Molempien menetelmien tuotantoa ollaan kuitenkin lisäämässä lisäinvestointien myötä. Paine-  
kylästettyä puuta valmistettiin pelkästään Suomessa vuonna 2016 noin 290 000 kuutiota. On siis selvää, että nämä uudet menetelmät ovat ainakin vielä huomattavasti pienemmässä roolissa painekylästyksen verrattuna. ThermoWood-tuotteita valmistettiin vuonna 2016 lähes 180 000 kuutiometriä, joten lämpöpuun markkinat ovat ainakin vielä selkeästi suuremmat kuin asetyloinnin ja furfuolinnin. (Kylästetyn puutavaran tuotanto Suomessa vuonna 2016; ThermoWood tuotantotilastot 2016; Mantanis 2017, 4480-4485.)

Tulevaisuudessa tullaan varmasti kiinnittämään yhä enemmän huomiota puutuotteiden ja muiden materiaalien ympäristöystävällisyyteen. Puu on uusiutuva luonnonvara, jonka jalostuksessa kuluu vähemmän energiaa kuin monilla muilla materiaaleilla. Puun jalostuksessa syntyviä sivutuotteita voidaan käyttää energiaksi. Puu on modifioitunakin usein ympäristöystävällisempi moniin muihin materiaaleihin verrattuna. Tulevaisuudessa voi olla, että lainsäädäntö tiukkenee, joten on tärkeää kehittää uusia ympäristöystävällisempiä modifiointimenetelmiä. Tosin tämäkin on vain spekulatiota. Voi olla, että perinteinen painekylästys tulee olemaan hallitsevassa roolissa vaativassa ulkokäytössä vielä todella pitkän ajan. Vaikuttaakin siltä, että tämän hetkisen tutkimustiedon perusteella ei mikään muu menetelmä pysty antamaan kupari- ja kreosoottikylästeiden tasoista suojaa laholta, sekä olemaan samalla hinnaltaan kilpailukykyinen.

Kuitenkin uusien modifiointimenetelmien mahdolliset markkinat ovat selvästi suuremmat kuin kupari- ja öljykylästeillä. Perinteisesti painekylästyksellä on pyritty parantamaan puun biologista suojaa, joten painekylästettyä puuta on käytetty vain ulkokäytössä. Paine-  
kylästettyä puuta ei käytetä sisätiloissa niiden terveyshaittojen vuoksi, eikä sisäkäytössä ole normaalisti tarvetta paremmalle biologiselle suojalle. Nykyisin uusia ympäristöystävällisempiä modifiointimenetelmiä voidaan käyttää myös sisätiloissa. Niiden etuja sisäkäytössä ovat mm. parempi kulutuksenkestävyys, kovuus ja dimensiostabiilisuus. Täten niillä on hyvät mahdollisuudet päästä markkinoille joissa painekylästettyä puuta ei käytetä, joten tulevaisuudessa voi olla, että esimerkiksi asetylointi ja

furfulointi hallitsevat jopa suurempia markkinoita kuin painekyllästys tällä hetkellä.

Vain aika näyttää kuinka modifioitu puu tulee menestymään ja mitkä modifiointimenetelmistä tulevat menestymään. Voi olla, että jollekin modifiointimenetelmälle kehitetään tulevaisuudessa toimiva ja edullinen valmistusmenetelmä, jolloin tuote voi lyödä hyvinkin nopeasti markkinoilla läpi. Tosin tätä ei varmasti tule tapahtumaan aivan lähitulevaisuudessa sillä uusien teknologioiden kehittämiseen kaupalliselle asteelle menee yleensä useita vuosia.

Seuraavaksi on yhteenvedot jokaisesta aiemmin käsitellystä modifiointimenetelmästä. Mukana löytyy myös SWOT-analyysit. SWOT-analyysissä (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) käydään läpi jokaisen menetelmän vahvuudet ja heikkoudet, sekä pohditaan niiden mahdollisuuksia ja uhkia. Vahvuuksissa ja heikkouksissa käydään enimmäkseen läpi ominaisuuksia mitä käsittely aiheuttaa puuhun. Mahdollisuuksissa ja uhissa käydään läpi modifiointi menetelmien tulevaisuuden näkymiä.

## **10.1 Yhteenveto lämpökäsittelystä**

Lämpökäsittelyä on tutkittu todella paljon erityisesti Suomessa. Tämä laajamittainen tutkimustyö on tärkeää, jotta saadaan kuluttajat vakuuttuneeksi tuotteen hyödyistä. Lämpökäsittely on myös suhteellisen edullinen menetelmä, sillä siihen ei tarvitse mitään kemikaaleja. Myös energiakustannukset eivät ole merkittävästi suuremmat verrattuna perinteiseen kamarikuivaukseen. Lämpökäsittelyn puun etuina on mm. ympäristöystävällisyys ja lähes rajaton värivalikoima, mitkä mahdollistavat sen käytön todella monissa käyttökohteissa.

Lämpökäsittelyn puun käyttökohteet ovat kuitenkin rajattuja, koska se ei sovellu maa- tai vesikosketukseen. Tästä herääkin kysymys, että onko kysyntää tuotteelle, joka on normaalia puuta kalliimpaa, mutta ei sovellu vaativaan ulko käyttöön. Kuitenkin ainakin ThermoWoodille on tuotantotilastojen perusteella paljon kysyntää ja kasvu on ollut vuosittain vahvasti nousujohteista. Lämpökäsittelyn puun valmistajat ovatkin selvästi onnistuneet löytämään oman asiakaskuntansa.

Taulukko 4. SWOT-analyysi lämpökäsitellystä puusta

<b>Lämpökäsitellyn puun SWOT-analyysi</b>	
<b>vahvuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ympäristöystävällinen menetelmä</li> <li>• parantunut dimensiostabiiliisuus</li> <li>• parantunut biologinen kestävyys</li> <li>• Tasapainokosteus laskee.</li> <li>• Lämmöneristyskyky kasvaa.</li> <li>• laajamittainen tutkimustyö</li> </ul>	<b>heikkoudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lahonkesto-ominaisuudet ovat selvästi heikompia kuin esim. painekyllästetyllä puulla.</li> <li>• Ei sovellu maa- tai vesikosketukseen.</li> <li>• mahdolliset pinta- ja sisähalkeamat</li> <li>• Oksien mahdollinen irtoilu ja halkeilu.</li> </ul>
<b>mahdollisuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laaja tutkimustyö, jolla saadaan asiakkaat vakuutetuiksi tuotteen ominaisuuksista.</li> <li>• Ympäristöystävällinen ja suhteellisen edullinen menetelmä, jolla saadaan monia ominaisuuksia parannettua.</li> </ul>	<b>uhat:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puutteellinen laadunvalvonta voi heikentää laatua merkittävästi</li> <li>• Hinta on tavallista sahatavaa kalliimpi, mutta ominaisuuksiltaan ei ole monien muiden menetelmien veroinen.</li> </ul>

## 10.2 Yhteenveto painekyllästyksestä

Painekyllästys on tunnettu ja laajasti käytetty puun modifiointimenetelmä. Tiukentuneet ympäristösäännökset ovat kuitenkin muuttaneet toimialaa merkittävästi ja tulevaisuudessa mahdollisesti entisestään tiukentuvat säädökset voivat rajoittaa alaa edelleen. Tutkimustyötä on tehty kyllästysaineiden korvaamisesta ympäristöystävällisemmillä aineilla. Esimerkiksi kreosootin korvaamista mäntyöljyllä on tutkittu, mutta mäntyöljykyllästys on ainakin vielä huomattavasti kalliimpaa. Painekyllästys tulee varmasti vielä olemaan käytössä useiden vuosien ajan, mutta pidemmällä aikavälillä voi painekyllästetyn puun käyttö vähentyä merkittävästi. Painekyllästetyn puun käyttökohteet ovat hyvin rajattuja sillä ne soveltuvat vain vaativaan ulkokäyttöön. Onkin todennäköistä, että painekyllästyksen kysyntä ei tule merkittävästi nousemaan, mutta se voi hyvinkin pysyä suurin piirtein samalla tasolla vielä pitkän aikaa.



Taulukko 5. SWOT-analyysi painekyllästyksestä perinteisillä kyllästysaineilla

<b>Painekyllästyksen SWOT-analyysi</b>	
<b>vahvuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hyvä biologinen suoja lahoa ja hyönteisiä vastaan</li> <li>• Kyllästysluokilla voidaan tehdä tuotteesta juuri käyttökohteeseen sopiva.</li> </ul>	<b>heikkoudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ympäristö- ja terveyshaitat</li> <li>• käytöstä poistetun tuotteen kierrätys</li> <li>• käyttökohteet rajattuja</li> </ul>
<b>mahdollisuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tunnettu ja luotettava menetelmä</li> <li>• Uusilla kyllästysaineilla voidaan mahdollisesti parantaa ympäristöystävällisyyttä.</li> </ul>	<b>uhat:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ympäristölainsäädäntö voi tulevaisuudessa tiukentua.</li> <li>• Kuluttajat alkavat vaatimaan yhä enemmän ympäristöystävällisempiä tuotteita.</li> </ul>

### 10.3 Yhteenveto vesilasikyllästyksestä

Vesilasikyllästys on ympäristöystävällinen menetelmä. Palonsuojaominaisuudet ovat hyvät vesilasikyllästetyllä puulla, joten sillä on potentiaalia kohteissa, joissa vaaditaan parempia palonsuojaominaisuuksia. Mikäli käyttökohteessa vaaditaan parempaa lahonsuojaa tai mittapysyvyyttä, on hyvä suorittaa kyllästyksen lisäksi myös lämpökäsittely. Ilman lämpökäsittelyä puun hygroskooppisuus lisääntyy, mikä lisää puuhun imeytyvän veden määrä mikä lisää lahon riskiä. Vesilasikyllästyksen ja lämpökäsittelyn yhdistäminen lisää kuitenkin valmistuskustannuksia.

Vesilasikyllästetystä puusta ei uutena tuotteena ole kovin paljon käyttökokeuksia. Vesilasikyllästyksestä vaaditaan varmasti vielä lisää tutkimusta. Erityisesti huonot käyttökokeemukset TimberSIL-tuotteista heikentää koko vesilasikyllästyksen mainetta. Tämän takia on tärkeää, että suoritetaan pitkäaikaisia tutkimuksia vesilasikyllästetyn puun käytöstä kohteissa, joissa puu joutuu säälle alttiiksi.

Taulukko 6. SWOT-analyysi vesilasikyllästyksestä

<b>Vesilasikyllästyksen SWOT-analyysi</b>	
<b>vahvuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hyvä palonsuoja</li> <li>• parantunut biologinen kestävyys</li> <li>• ympäristöystävällisyys</li> <li>• parantunut kovuus ja kulutuksenkestävyys</li> </ul>	<b>heikkoudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ulkokäytössä vaatii yleensä myös lämpökäsittelyn.</li> <li>• Työstettäessä terät kuluvat nopeammin.</li> </ul>
<b>mahdollisuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vähäisen tutkimustiedon vuoksi voidaan vielä löytää parempia tuotantomenetelmiä, jolla voidaan parantaa ominaisuuksia ja pienentää kustannuksia.</li> <li>• Tulevaisuudessa voi olla perinteisen painekyllästyksen korvaaja.</li> </ul>	<b>uhat:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kyllästyksen ja lämpökäsittelyn yhdistäminen voi olla liian kallista.</li> <li>• epävarma vähäisen tutkimustiedon ja käyttökokemusten vuoksi</li> <li>• huonot käyttökokemukset (TimberSIL)</li> </ul>

#### 10.4 Yhteenveto asetyloinnista

Puun asetylointia on tutkittu laajasti yli 60 vuoden ajan ja tutkimista jatketaan varmasti vielä tulevaisuudessa. Erityisesti on tarpeen järjestää asianmukaisia tutkimusta kansainvälisellä tasolla. (Hill 2006, 76.)

Viime aikoina on saatu lupaavia tuloksia asetyloinnin biologisesta kestävydestä. Asetyloitu puu sopii maa- ja vesikosketukseen. Haasteena on saada tuotua markkinoinnissa esiin asetyloidun puun hyvät ominaisuudet ja sen ympäristöystävällisyys. Haasteena on myös kalliit investointi- ja tuotantokustannukset. Tutkimustulokset osoittavat asetyloidun puun ominaisuuksien olevan hyvät, joten tulevaisuudessa tulisikin pyrkiä pienentämään tuotantokustannuksia, jotta siitä saataisi kilpailukykyinen. Asetyloinnin kehittäminen Suomessa on kuitenkin rajattua, sillä menetelmä ei sovellu hyvin pohjoismaiselle männylle, koska puuhun jäävä etikkahappoa ei saada poistettua.

Taulukko 7. SWOT-analyysi asetyloinnista

<b>Asetyloinnin SWOT-analyysi</b>	
<b>vahvuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hyvä biologinen kestävyys myös maa- ja vesikosketuksessa (jopa CCA-kyllästeiden veroinen)</li> <li>• hyvä dimensiostabiilisuus</li> <li>• pienempi tasapainokosteus</li> <li>• ympäristöystävällinen</li> <li>• Suojaa termiittejä vastaan suurilla pitoisuuksilla.</li> <li>• Suojaa laivamadoilta.</li> </ul>	<b>heikkoudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei sovellu hyvin pohjoismaiselle männylle.</li> <li>• Puuhun jää käsittelyn jälkeen etikkahappoa, joka on poistettava.</li> <li>• etikkahapon korrosoiva vaikutus</li> <li>• Korkeilla WPG-arvoilla lujuusominaisuudet heikentyvät.</li> </ul>
<b>mahdollisuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hyvän biologisen suojan antavan ja ympäristöystävälliselle modifiointimenetelmälle tulee tulevaisuudessa olemaan kysyntää.</li> <li>• paljon tutkimustietoa</li> </ul>	<b>uhat:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prosessin investointi- ja tuotantokustannukset voivat olla liian korkeat.</li> <li>• Tuotantomahdollisuudet ovat rajattuja, sillä menetelmä soveltuu hyvin vain muutamille puulajeille.</li> </ul>

## 10.5 Yhteenveto furfuloinnista

Furfuloitu puu soveltuu hyvien ominaisuuksiensa ansiosta todella moniin käyttökohteisiin. Hyvän biologisen suojan vuoksi se soveltuu ulkokäyttöön ja jopa maa- ja vesikosketukseen. Furfuryylialkoholi on ympäristöystävällinen ja uusiutuvista luonnonvaroista valmistettava kemikaali. Parantuneen kovuuden ja kulutuksenkestävyyden ansiosta se soveltuu hyvin myös sisäkäyttöön esimerkiksi lattiamateriaaliksi. Trooppisen puun ulkonäkönsä vuoksi sillä voidaan korvata kalliita ja uhanalaisia trooppisia puulajeja. Furfuloidun puun mahdolliset käyttökohteet ovatkin hyvin laajat.

Suurimmat heikkoudet furfuloinnille on varmasti korkeaksi nousevat tuotantokustannukset. Furfuryylialkoholia tarvitaan paljon prosessissa ja sen hinta on korkea. Lisäksi prosessi on kolmivaiheinen. Kuitenkin tulevaisuudessa voidaan löytää katalyyttejä ja lisäaineita, jolla lämpökäsittelyn aikaa voidaan lyhentää ja lämpötilaa laskea. Furfuryylialkoholin määrää voidaan mahdollisesti myös vähentää katalyyteillä, jolloin kustannuksia saadaan laskettua.

Taulukko 8. SWOT-analyysi furfuloinnista

<b>Furfuloinnin SWOT-analyysi</b>	
<b>vahvuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Furfuryylialkoholi on ympäristöystävällinen uusiutuvista luonnonvaroista valmistettava kemikaali.</li> <li>• hyvä dimensiostabiilisuus</li> <li>• Suojaa lahoa, hyönteisiä ja laivamatoja vastaan.</li> <li>• parempi kovuus</li> <li>• trooppisen puun ulkonäkö</li> </ul>	<b>heikkoudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prosessin korkea lämpötila lisää halkeamisriskiä.</li> <li>• kallis menetelmä</li> </ul>
<b>mahdollisuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biologisen suojan antavalle ja ympäristöystävälliselle modifiointimenetelmälle tulee tulevaisuudessa olemaan kysyntää.</li> <li>• Soveltuu moniin käyttökohteisiin.</li> </ul>	<b>uhat:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tuotantokustannukset voivat olla liian korkeita. <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Kolmivaiheinen valmistusprosessi joka nostaa valmistuskustannuksia.</li> <li>○ Prosessissa tarvitaan suuria määriä furfuryylialkoholia ja sen hinta on melko korkea.</li> </ul> </li> </ul>

## 10.6 Yhteenveto puu-muovikomposiiteista

Puu-muovikomposiittien tulevaisuus näyttää lupaavalta. Puu-muovikomposiitit sekä muut luonnonkuitukomposiitit ovat kasvattaneet suosiotaan voimakkaasti 2000-luvulla. Puumuovikomposiittien käyttökohteet ovat hyvin laajat, sillä sahatarvarasta poiketen niitä ei rajoita syysuunta, eikä niissä ole sahatarvaran virheitä kuten oksia. Puu-muovikomposiittien tuotannon kannattavuutta voidaan merkittävästi parantaa, kun muovien kierrätystä parannetaan. Puu-muovikomposiitit ovat hyvin ympäristöystävällisiä, mikäli käytetään kierrätysmateriaaleja.

Suomessakin puu-muovikomposiiteilla on mahdollisuuksia. Puuraaka-ainetta on saatavissa laajasti mm. sahoilta, vaneritehtailta. Myös esimerkiksi metsähaketta voidaan käyttää raaka-aineena. Jotta puu-muovikomposiittien valmistuksesta tuli kannattavaa, on muovien kierrätystä ja kierrätysmuovin lajittelua

parannettava. Puu-muovikomposiiteilla on itseasiassa mahdollisuutta menestyä melkein missä päin maailmaa tahansa. Puuta tai puumaista materiaalia löytyy ympäri maailmaa ja muovijätettä löytyy varmasti joka maailman kolkasta. Puu-muovikomposiitit ja muut kierrätysmuoveihin perustuvat tuotteet voivatkin omalta osaltaan ratkaista muovijätteestä aiheutuvia ongelmia.

Taulukko 9. SWOT-analyysi puu-muovikomposiiteista

<b>Puu-muovikomposiittien SWOT-analyysi</b>	
<b>Vahvuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tasalaatuinen materiaali (ei syy suuntaa ym.)</li> <li>• parantunut dimensiostabiiliisuus kosteusvaihtelussa</li> <li>• hyvä biologinen suoja</li> <li>• Lisäaineilla voidaan muokata tuotetta käyttökohteeseen sopivaksi.</li> <li>• helppo huollettavuus</li> </ul>	<b>Heikkoudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lujuusominaisuudet ovat yleisesti ottaen massiivipuuta heikommat.</li> <li>• lämpölaajeneminen</li> </ul>
<b>Mahdollisuudet:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soveltuu käyttökohteisiin, joissa puuta ei voi normaalisti käyttää</li> <li>• Voidaan valmistaa kierrätysmateriaaleista.</li> <li>• Komposiittien valmistuksella voitaisiin kehittää muovien kierrätystä ja sillä voitaisiin osittain ratkaista muovijätteen ongelmat.</li> </ul>	<b>Uhat:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kierrätysmuovin saatavuus ja sen lajittelu voi olla ongelma. <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ilman kierrätysmuovia tuotteen ekologisuus laskee ja kustannukset nousevat.</li> </ul> </li> </ul>

## LÄHTEET

Boren, H. 2010. Tulevaisuuden sähköpylväs. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [https://energia.fi/files/1043/Tulevaisuuden\\_sahkopylvaat\\_loppuraportti.pdf](https://energia.fi/files/1043/Tulevaisuuden_sahkopylvaat_loppuraportti.pdf) [viitattu 25.1.2018].

Gibson, S. 2016. TimberSIL May Live to See Another Day. WWW-dokumentti. Päivitetty 27.4.2016. Saatavissa: <http://www.finehomebuilding.com/2016/04/27/timbersil-may-live-to-see-another-day> [viitattu 11.1.2018].

Grand view research. 2016. Wood Plastic Composite (WPC) Market By Type (Polyethylene, Polyvinylchloride, Polypropylene, Others), By Application (Building & Construction Products, Automotive Components, Industrial & Consumer Goods, Others), By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, Latin America, Middle East and Africa) -Global Trends & Segment Forecast to 2024. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-plastic-composites-market> [viitattu 25.1.2018].

Hill, C. 2006. Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes, Chichester, UK: John Wiley & sons Ltd.

Homan, W. & Jorissen, A. 2004. Wood modification developments. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <http://heronjournal.nl/49-4/5.pdf> [viitattu 25.1.2018].

Karjalainen, M. s.a. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentaminen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa> [viitattu 16.1.2018].

Keskisaari, A. 2017. Kierrätysmateriaalit voivat parantaa puu-muovikomposiittituotteita. *Puumies* 10/2017, 14-15.

Kestopuuteollisuus Ry. s.a. Kestopuun laatu. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kestopuu.fi/kyllastetty-puu/kestopuun-laatu.html> [viitattu 22.1.2018].

Kiukas, I., Soininen, H., Mäkelä, L. & Pouru, M. 2007. Puun lämpökäsittelyssä muodostuvien hajukaasujen puhdistaminen biosuotimella, A: Tutkimuksia ja raportteja 19. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu.

Koski, A. 2008. Applicability of crude tall oil for wood protection. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789514287237.pdf> [Viitattu 25.1.2018].

Kyllästetyn puutavaran tuotanto Suomessa vuonna 2016. Kestopuuteollisuus Ry. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <http://www.kestopuu.fi/tiedostopankki/284/Kestopuu-Tuotantotilasto-2016.pdf> [Viitattu 12.1.2018].

Kärkkäinen, M. 2005. Maailman metsäteollisuus. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Helsinki: Metsäkustannus Oy.

Lahontorjuntayhdistys Ry. 1985. Kyllästämöiden ympäristönsuojelu- ja työsuojeluohje. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

Li, W., Ren, D., Zhang, X., Wang, H. & Yu, Y. 2016. The Furfurylation of Wood: A Nanomechanical Study of Modified Wood Cells. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_11\\_2\\_3614\\_Li\\_Furfurylation\\_Wood\\_Nanomechanical\\_Study\\_Modified\\_Wood/4296](http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_11_2_3614_Li_Furfurylation_Wood_Nanomechanical_Study_Modified_Wood/4296) [26.11.2017].

Lämpöpuuyhdistys Ry. 2017. Yhdistys. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://thermowood.palvelee.fi/> [Viitattu 25.1.2018].

Mahlberg, R. 1988. Puun asetylointi etikkahappoanhydridillä, VTT tiedotteita 878. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Mantanis, G. I. 2017. Chemical Modification of Wood by Acetylation or Furfurylation: A Review of the Present Scaled-up Technologies. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_12\\_2\\_Mantanis\\_Review\\_Chemical\\_Modification\\_Wood\\_Acetylation/5287](http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_12_2_Mantanis_Review_Chemical_Modification_Wood_Acetylation/5287) [viitattu 25.1.2018].

Möller, K. & Otranen, L. 1999. Puun lämpökäsittely. 2. painos. Mikkeli: Ympäristötekniikan instituutin julkaisuja 4.

Painekyllästetyn kestopuun käyttöturvallisuusohje. 2011. Kestopuuteollisuus Ry. Pdf-tiedosto. Saatavilla: [http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/sahatavaran-jatkojalosteet/K%C3%A4ytt%C3%B6turvallisuusohje\\_Kestopuu.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/sahatavaran-jatkojalosteet/K%C3%A4ytt%C3%B6turvallisuusohje_Kestopuu.pdf) [viitattu 25.1.2018].

Puuinfo. s.a. Accoya®-puu. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/tuote/accoya%C2%AE-puu> [viitattu 25.1.2018].

Puuinfo. s.a. Kosteusteknisiä ominaisuuksia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia> [viitattu 25.1.2018].

Puuinfo. s.a. Lujuusteknisiä ominaisuuksia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/lujuusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia> [viitattu 15.1.2018].

Puuinfo. s.a. Ympäristö- ja resurssitehokkuus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/ymp%C3%A4rist%C3%B6tehokkuus> [viitattu 13.1.2018].

Puu-muovikomposiitit. s.a. Lappeenrannan yliopisto. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <http://telwood.eu/Puumuovikomposiitit.pdf> [viitattu 29.11.2017].

Q-Treat. 2013. Stora Enso. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <http://www.taalon.info/pdf/q-treat-esite.pdf> [viitattu 11.1.2018].



Rowell, R. M. 2005. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, USA: CRC Press.

RT 21-10880. 2006. Rakennustieto Oy. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/sahatavaran-jatkojalosteet/RT%2021-10880.pdf> [viitattu 25.1.2018].

Sandberg, D. & Kutnar, A. 2015. Thermally modified timber: Recent developments in Europe and North America. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2296/2278> [viitattu 25.1.2018].

ThermoWood®-käsikirja. 2003 - 2004. Lämpöpuuyhdistys ry. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/914711200401161255\\_twkasikirja.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf) [viitattu 24.1.2018].

ThermoWood tuotantotilastot. 2016. Lämpöpuuyhdistys Ry. Pdf-tiedosto. Saatavissa: <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Productionstatistics2016.pdf> [Viitattu 22.1.2018].

The Third European Conference on Wood Modification. 2007. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [http://s3.amazonaws.com/zanran\\_storage/www.tmu.ir/ContentPages/43562498.pdf](http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.tmu.ir/ContentPages/43562498.pdf) [viitattu 24.1.2018].

Tähkälä, T. & Tomperi, T. 2015. Tuoteinformaatiota jaetaan kuluttajaa palveleen. *Puumies* 10/2015, 8-9.

Viitaniemi, P. & Jämsä, S. 1996. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä, VTT Julkaisuja 814. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Väärä, T. & Boren, H. 2012. Puun modifiointiklusteri, Loppuraportti. Sarja B. Nro 84. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Väärä, T. & Turunen, H. 2014. Modifioidut Puutuotteet. Sarja A. Nro 49. Kouvolaa: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Kosteuselämiseen vaihtelee suuresti eri suunnissa. WOODWEB, Inc. WWW-dokumentti. Saatavissa: [http://www.woodweb.com/knowledge\\_base/Warp\\_in\\_Drying.html](http://www.woodweb.com/knowledge_base/Warp_in_Drying.html)

Kuva 2. Euroopanmarjakuusen tumma sydänpuu ja sitä ympäröivä vaalea pinta-  
tapuu. Wikipedia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Syd%C3%A4npuu>

Kuva 3. Kaaviokuva Thermowood-prosessista. ThermoWood® -käsikirja. 2003 - 2004. Lämpöpuuyhdistys ry. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/914711200401161255\\_twkasikirja.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf)

Kuva 4. Lämpökäsitellyn männyn väri. ThermoWood® -käsikirja. 2003 - 2004. Lämpöpuuyhdistys ry. Pdf-tiedosto. Saatavissa: [https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/914711200401161255\\_twkasikirja.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.palvelee.fi/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf)

Kuva 5. Kuparikyllästettyä kestopuuta on saatavilla ruskeana ja vaalean vihreänä. Kuusisto Group. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kuusistogroup.com/?product=kestopuu/erikoismallit/28x58-suunnikas>

Kuva 6. Furfulointi tekee puun väristä tummemman. Kebony AS. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://kebony.com/us/product/kebony-character-decking-1-18-x-4-34/>